



Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne

Madi Kaboré

► To cite this version:

Madi Kaboré. Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne. Génie civil. Université Grenoble Alpes; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2015. Français. NNT : 2015GREAA001 . tel-01207884

HAL Id: tel-01207884

<https://theses.hal.science/tel-01207884>

Submitted on 1 Oct 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

préparée dans le cadre d'une cotutelle entre l'Université Grenoble Alpes et l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE

Spécialité : **Génie Civil et Sciences de l'Habitat**

Arrêté ministériel : le 6 janvier 2005 - 7 août 2006

Présentée par

Madi Kaboré

Thèse dirigée par **Patrice Moreaux et Yézouma Coulibaly**
et codirigée par **Étienne Wurtz**

préparée au sein de **LISTIC-EA3703 et LESEE**
et de **ED-SISEO et ED-2iE**

Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique sub-saharienne

Thèse soutenue publiquement le **27 janvier 2015**,
devant le jury composé de :

M. Kossi NAPO

Professeur, Université de Lomé, Président

M. Joseph BATHIEBO

Professeur, Université de Ouagadougou, Rapporteur

M. Denis BRUNEAU

Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux I2M, Rapporteur

M. Adamah MESSAN

Maître Assistant (CAMES), 2iE, Examineur

M. Yézouma COULIBALY

Maître de Conférences (CAMES), 2iE, Directeur de thèse

M. Patrice MOREAUX

Professeur, Université Savoie Mont Blanc, Directeur de thèse

M. Étienne WURTZ

Directeur de Recherches, CEA-INES, Co-Directeur de thèse



À ma mère

*Nulle pierre ne peut être polie sans friction, nul homme ne peut parfaire son
expérience sans épreuve
Kong Qiu (Conficius)*

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Yézouma Coulibaly, Patrice Moreaux et Etienne Wurtz, mes directeurs de thèse, pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur une thématique aussi intéressante. J'ai fortement apprécié la confiance et la grande autonomie qu'ils m'ont accordées, me permettant de découvrir non sans difficulté le monde de la recherche. Merci pour les nombreuses opportunités offertes à travers la participation à des projets de recherche qui m'ont permis de m'initier aux environnements de projet.

Je remercie M. Joseph BATHIEBO, Professeur à l'Université de Ouagadougou et M. Denis BRUNEAU, Maître de Conférence HDR à l'Université de Bordeaux I2M pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire ainsi que de l'intérêt qu'ils lui ont accordé.

Je voudrais remercier sincèrement M. Kossi NAPO, Professeur à l'Université de Lomé, pour avoir accepté le rôle d'examinateur.

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail et en particulier :

- l'ensemble du personnel de LESEE et du LEMC. Je remercie sincèrement M. Adamah Messan et M. François Tsobnang pour leur disponibilité et leur contribution à ce travail. Je tiens à remercier M. Yao Azoumah, pour ses nombreux conseils et sa bienveillance. Je voudrais remercier Remy, Lawane, Prof Pantet, Kokolé, Césaire, Arnaud et Salif pour leur accompagnement tout au long de ce travail. Un grand merci à tous les membres du club choco et son président Gaye.
- l'ensemble du personnel de LISTIC et du LOCIE. Merci à M. Patrick Lambert et M. Benoit Stutz pour m'avoir accueilli à plusieurs reprises dans leurs équipes. Mes remerciements vont également à Joelle Pellet et à Elisabeth Desbos pour leurs gentilleses et leurs assistances dans les démarches administratives.
- l'ensemble du personnel de LEB et de l'INES. Merci à Louis, pour sa contribution et ses remarques pertinentes sur ce travail. Je voudrais remercier Arnaud et Adrien pour leurs aides multiformes. Merci à Véronique et Isabelle pour leur gentillesse.
- l'équipe du LESBAT pour m'avoir accueilli et facilité le séjour en Suisse. Je remercie particulièrement M. Stéphane Cirthelet, M. Alexis Duret, M. Jacques Bony (et la famille Bony), Isabelle, Blaise et Didier. J'ai été sincèrement touché par ce séjour très chaleureux.
- Mme Valerie Sanou et son équipe de la direction générale de l'architecture ainsi que la CGE pour avoir facilité les échanges dans le cadre du partenariat avec le programme 10000 logements sociaux.
- mes amis doctorants et anciens doctorants, Jeanne, Antone, Sebastien Wul-

lens, Mickael, Sebastien Pinard, Edem, Xavier, Parfait, Yannick, Noamen, Soufiane, Guillaume, Baité, Soré, Antone, Yasmine, Nafi, Decroly, Freddy, pour tous les moments inoubliables que nous avons passés ensemble.

J'aimerais remercier le LBEB où j'ai servi comme ingénieur de recherche. Merci à Joel Blin et François Xavier Collard pour cette première expérience dans le monde de la recherche. J'adresse également mes remerciements à Sayon, Nathalie, Micha, Wilfried, Mbaye, Charly, Arnaud, Salif, Eric pour leurs amitiés.

Je remercie tout particulièrement Jonathan Leclerc (mon frère!) pour mon accueil en France et pour avoir guidé mes pas dans la vie savoyarde. Je remercie également Mohammad. Merci pour les nombreux échanges que j'ai eu avec vous et votre solidarité agissante. Je voudrais également remercier la famille Wurtz pour leur bienveillance à mon égard lors de mes séjours en France.

J'adresse mes remerciements à Wenceslas, Yannick, Ousmane, Kadi, Adama, Simon, Hubert, Oumarou et Sylvain mes amis de tous les jours. Merci pour avoir partagé mon quotidien pendant ces dernières années. J'aimerais adresser ma profonde gratitude à Adjara pour sa tendresse, sa compagnie, sa bonne humeur et son soutien inconditionnel.

Un grand merci au club de foot de Somassom et à son Quartier général, où après le football ont défait et refait le monde. Merci pour votre soutien et la bonne humeur. De ce fait je remercie très sincèrement Issouf (cool), Mouni, Soumaila (prési), Salif, Donald, rock parfait, Mathias, M. Harouna, M Boureima, Fatogoma et Aziz.

Enfin je tiens à remercier ma famille et surtout ma mère, qui a fait tant de sacrifice pour que j'arrive à ce niveau. Je remercie également mes sœurs et mes cousins qui ont été d'un grand soutien. Merci à mes oncles et mes tantes pour leur assistance et leur soutien.

Résumé : Dans les pays de l'Afrique sub-saharienne, la situation énergétique, le fort taux d'accroissement des aires urbaines, l'inadaptation des techniques de construction et le climat offrent un grand potentiel pour la démarche bioclimatique et la construction durable notamment sur le plan énergétique. Cependant ce potentiel est faiblement exploré. Pour ce faire, cela passe par une bonne connaissance du comportement des bâtiments et par leur adaptation au contexte climatique. Dans le cadre de notre contribution à cette problématique, une étude sur le comportement thermique des bâtiments est initiée grâce à la simulation. En effet la simulation des performances énergétiques du bâtiment devient de plus en plus incontournable dans les processus de conception et d'analyse des bâtiments à travers le monde.

Dans ce travail les outils de simulation des performances énergétiques ainsi que les outils d'optimisation sont utilisés pour mener des investigations sur un bâtiment type construit en matériaux conventionnels au Burkina Faso suivant deux principales approches. Dans la première approche le modèle numérique du bâtiment est confronté aux mesures issues de l'expérimentation sur le bâtiment réel. Une méthodologie de calibration basée sur l'analyse de sensibilité et l'optimisation des paramètres a été appliquée pour la comparaison des résultats. Cela a permis de caler le modèle et des études diagnostiques sont réalisées.

Dans la seconde approche, des investigations sur des solutions d'amélioration des performances du bâtiment sont réalisées à travers l'application de la simulation dynamique comme outils d'aide à la conception. Les techniques d'interopérabilité et d'optimisation sont utilisées pour implémenter les solutions de refroidissement passif dont les impacts sur le bâtiment étudié sont évalués. Enfin dans ce travail, des techniques d'analyse du bâtiment et des critères de performance sont utilisées pour caractériser et formuler des recommandations sur la conception des bâtiments dans notre contexte climatique.

Mots clés : Simulation, Calibration, Refroidissement passif, Confort thermique, Conception bioclimatique

Abstract : In sub-Saharan African countries, the energy context, the high urban growth, inadequate construction techniques and climate offer great potential for bio-climatic approach and sustainable construction particularly on the energy level. However, this potential and the use of passive cooling techniques are weakly explored. To do so, it requires a good knowledge of building's behaviour and their adaptation to the climatic context. As part of our contribution to this issue, a study on the thermal behaviour of buildings is initiated by numerical simulation. Indeed the building's energy performance simulation tools are becoming more essential in the building's design processes and analysis.

Investigations are conducted on a building built with typical materials in Burkina Faso by following two main approaches. In the first approach a model of the building is faced with measurements from field experiments on the building. A calibration methodology based on the sensitivity analysis and optimization has been applied for the comparison of results. This helped to calibrate the model and diagnostic studies are performed.

In the second approach, investigations on methods which can help to improve the building performance are realized through the application building performance simulation as a design aid tool. Interoperability and optimization techniques are used to deal with passive cooling techniques and their impacts on the building thermal behaviour are assessed. Finally in this work analysis techniques and performance criteria are used to characterize and make recommendations on building designs for the tropical climate context.

Keywords : Simulation, Calibration, Passive cooling, Thermal comfort, Bioclimatic design

Table des matières

Introduction générale	1
1 Conception de bâtiments passifs en climat tropical	5
1.1 Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne	5
1.1.1 Le contexte énergétique et efficacité énergétique	5
1.1.2 Habitat, énergie et climat : évolution en Afrique	7
1.1.2.1 Regard sur l'habitat traditionnel	7
1.1.2.2 Regard sur l'habitat contemporain	10
1.1.2.2.1 Les matériaux de construction	11
1.1.2.2.2 Concernant la forme des bâtiments	11
1.1.2.2.3 L'occupation de l'habitat	12
1.1.2.3 Le secteur du bâtiment au Burkina Faso	13
1.2 Les interactions entre le bâtiment et son environnement	16
1.2.1 Le climat du Burkina Faso	16
1.2.2 Soleil et bâtiment	20
1.2.3 Les échanges thermiques dans le bâtiment	21
1.2.4 Caractérisation du confort thermique	23
1.2.4.1 Les standards et normes de confort thermique	24
1.2.4.1.1 L'approche analytique	24
1.2.4.1.2 Approche adaptative	26
1.2.4.2 Les diagrammes bioclimatiques	27
1.2.4.2.1 Le diagramme d'Olgay	28
1.2.4.2.2 Le diagramme de GIVONI	28
1.2.5 La conception bioclimatique	30
1.3 Le refroidissement passif de l'habitat	32
1.3.1 Techniques de protections solaires	32
1.3.2 Les techniques de dissipation de la chaleur et la ventilation naturelle	35
1.3.2.1 La ventilation naturelle	35
1.3.2.2 Le refroidissement Radiatif	36
1.4 Conclusion	38
2 Une approche innovante de la simulation des performances éner- gétiques du bâtiment	39
2.1 Introduction	39
2.2 La simulation des performances énergétiques du bâtiment	40
2.2.1 Modélisation et simulation du bâtiment	40

2.2.2	Évolution des outils simulation énergétique du bâtiment . . .	42
2.2.3	La simulation : outil d'aide à la conception	43
2.2.4	La simulation : étude du comportement des bâtiments existants	44
2.2.5	Freins à l'utilisation de la simulation dans le bâtiment	44
2.2.5.1	Freins dus aux outils	45
2.2.5.2	Freins utilisateurs	45
2.2.5.3	Freins à l'utilisation de simulation calibrés	45
2.3	Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment	46
2.3.1	Les enjeux de l'interopérabilité	46
2.3.1.1	Approche de modélisation et simulation hétérogène dans le bâtiment	46
2.3.1.2	L'interopérabilité des données des modèles	48
2.3.1.3	L'interopérabilité des processus des modèles ou co-simulation mono-moteur	49
2.3.1.4	L'interopérabilité des processus ou co-simulation multimoteur	50
2.3.1.5	Le Functional Mock-up Interface (FMI)	51
2.3.2	Les outils les plus utilisés au niveau international	52
2.3.3	Les besoins d'optimisation	55
2.3.3.1	Présentation des algorithmes utilisés	56
2.3.3.2	Description des algorithmes GPS et PSO	56
2.3.3.3	Choix du logiciel d'optimisation	57
2.4	Conclusion	58
3	Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne	61
3.1	Validation des résultats issus de la simulation de modèles détaillés du bâtiment	62
3.1.1	Les incertitudes dans le modèle	62
3.1.2	Les méthodologies de calibration des modèles détaillés du bâtiment	63
3.1.3	Les critères de validation	64
3.2	Descriptif de l'expérimentation	65
3.2.1	Le bâtiment expérimental	65
3.2.2	Monitoring du bâtiment	66
3.2.3	Sollicitations climatiques	68
3.3	Simulation du comportement thermique du bâtiment	68
3.3.1	Les hypothèses de modélisation	68
3.3.1.1	L'enveloppe du bâtiment	68
3.3.1.2	La ventilation et l'infiltration	71

Table des matières

3.3.1.3	Modèle numérique et initialisation	72
3.3.2	Confrontation entre simulation et expérimentation	72
3.4	Calibration du modèle détaillé du bâtiment	75
3.4.1	Analyse de sensibilité	76
3.4.1.1	Identification des paramètres et description de la méthodologie	76
3.4.1.2	Résultats de l'analyse de sensibilité	78
3.4.2	Optimisation des paramètres du modèle	79
3.4.2.1	Description	79
3.4.2.2	Résultat de l'optimisation des paramètres	80
3.4.2.3	Validation	81
3.5	Application du modèle calibré à l'étude des transferts thermiques dans le bâtiment	82
3.6	Conclusion	87
4	Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique	89
4.1	Étude du confort thermique dans le bâtiment expérimental	90
4.1.1	Les paramètres de la simulation	90
4.1.1.1	Scénario des charges internes	90
4.1.1.2	Les conditions climatiques	91
4.1.2	Évaluation du confort dans la configuration initiale	91
4.1.2.1	Évaluation selon la zone de confort thermique de Givoni	91
4.1.2.2	Évaluation selon la méthode de confort adaptatif de l'ASHRAE	93
4.1.2.3	Analyse de sensibilité locale : bâtiment en évolution libre	95
4.2	Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture	96
4.2.1	Amélioration des éléments de toiture	97
4.2.1.1	Introduction	97
4.2.1.2	Méthodologie et simulation	99
4.2.1.2.1	Les types de toitures	99
4.2.1.2.2	Modélisation et outils de simulation	99
4.2.1.3	Résultats	101
4.2.1.3.1	Comparaison des deux configurations de toitures	101
4.2.1.3.2	Cas de la toiture simple	102
4.2.1.3.3	Cas de la toiture avec comble	105
4.2.1.3.4	La ventilation naturelle dans la configuration actuelle	107
4.2.1.4	Conclusion : amélioration des éléments de toiture	109

4.2.2	Amélioration des performances thermiques des ouvertures . .	111
4.2.2.1	Introduction	111
4.2.2.2	Simulation et méthodologie	113
4.2.2.3	Évaluation du cas existant par la simulation	113
4.2.2.4	Choix du type de protection solaire fixe par la méthode d'occultation solaire	115
4.2.2.5	Optimisation des éléments des ouvertures	120
4.2.2.5.1	Les impacts de la loggia sur les gains de chaleur . .	120
4.2.2.5.2	Les impacts de la loggia sur l'éclairage naturel . . .	121
4.2.2.5.3	Optimisation des dimensions de la fenêtre et de la loggia	122
4.2.2.6	Conclusion : performances thermiques des ouvertures	126
4.3	Études comparatives du confort thermique par la simulation	128
4.3.1	Impact des surfaces réfléchissantes sur le confort thermique .	128
4.3.1.1	La configuration du toit simple	129
4.3.1.2	La configuration du comble	129
4.3.2	Amélioration du confort thermique par les ouvertures	130
4.3.2.1	Impact des ouvertures sur le confort thermique dans les bâtiments en évolution libre	130
4.3.2.2	Les effets des ouvertures sur la consommation d'énergie dans les ambiances contrôlées	132
4.3.2.2.1	L'impact sur la consommation d'énergie pour le refroidissement	132
4.3.2.2.2	Analyse de sensibilité locale : ambiance contrôlée .	133
4.3.3	Comparaison des différentes configurations et analyse des heures d'inconfort	136
4.4	Conclusion	139
Conclusion		141
A ANNEXE		145
Bibliographie		153

Table des figures

1.1	Typologie de toiture selon la zone climatique,(Zhai and Previtali, 2010)	8
1.2	Illustration habitat traditionnel Brasseur (1975) :A : La hutte nomade(parpaing creux);B : La case ronde; C : La case à terrasse (BTC); D : La case rectangulaire de la forêt	9
1.3	Mutations dans le secteur du bâtiment : A-C bâtiments traditionnels; B-D bâtiments modernes	12
1.4	Les éléments de maçonnerie courants :A : Aggloméré de ciment(parpaing creux); B : Brique en terre crue (Banco); C : Blocs de terre comprimée (BTC); D : Blocs de latérites taillées (BLT)	15
1.5	Classification climatique de KoppenGigger	18
1.6	Ensoleillement global, diffus and direct de Ouagadougou	19
1.7	Analyse des températures du fichier TMY (Climate consultant)	19
1.8	Analyse des humidités relatives du fichier TMY (Climate consultant)	20
1.9	Rose des vents de la ville de Ouagadougou	21
1.10	Spectre du soleil (Herde and A.Liébard, 1996-2004)	22
1.11	PPD en fonction de PMV	25
1.12	Carte illustrant les travaux sur le confort adaptatif dans le monde	28
1.13	Diagramme bioclimatique Olgyay (1963)	29
1.14	Diagramme de Givoni	29
1.15	Les standards d'énergie dans le bâtiment et pays en développement repris de Iwaro and Mwasha (2010)	31
1.16	Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments économes en énergie	32
1.17	Projection stéréographique du parcours du soleil pour le cas de Ouagadougou	33
1.18	Zones de pertinence des CVC repris de Ghiaus (2006)	37
2.1	Illustration des données d'entrée pour les outils de simulation	41
2.2	Évolution des outils et aptitudes à décrire le système réel' repris de (Clarke, 2001)	42
2.3	Les domaines interagissant dans le bâtiment (Projet ANR-SIMINTHEC)	47
2.4	co-simulation monomoteur	49
2.5	Co-simulation multimoteur	50
2.6	FMI pour l'échange de modèle : A) export de modèles et B) Import de modèles	51
2.7	FMI pour la simulation : A) export de modèles B) Import de modèles C) Co-simulation sur un poste de travail	52

2.8	Le programme EnergyPlus	54
2.9	Principe de couplage de Genopt et EnergyPlus	58
3.1	Le Plan du bâtiment	66
3.2	La Composition du mur et du plancher	67
3.3	La plateforme expérimentale sur le site de Bassinko	67
3.4	La température de l'air, les ensoleillements, et l'humidité relative du 14 au 23 février 2014	69
3.5	Rendu géométrique du modèle EnergyPlus	70
3.6	Les températures mesurées et simulées de l'air de la zone et de la toiture	73
3.7	Les températures mesurées et simulées des parois Sud et Est	74
3.8	Coefficient de détermination entre mesures et simulations	75
3.9	Influence (indice de sensibilité) des paramètres d'entrée sur la fonc- tion objectif de calibration	78
3.10	Température mesurées et simulées après optimisation pour l'air de la zone et la toiture	82
3.11	Les températures mesurées et simulées après optimisation pour l'air de la zone et la toiture	83
3.12	Les températures mesures et simulation après optimisation parois Sud et Est	84
3.13	Les températures mesurées et simulées hors de la période de calibra- tion air et toit	85
3.14	Les températures mesurées et simulées : parois Sud et Est	86
3.15	Phénomène de convection et de conduction en cours dans le bâtiment	87
3.16	Phénomène de rayonnement et échange de chaleur dus à l'infiltration	87
4.1	scénario d'occupation	90
4.2	Évaluation du confort thermique par le diagramme bioclimatique de Givoni dans configuration Initiale	92
4.3	Évaluation du confort thermique par la méthode de Givoni dans configuration Initiale : mois type froid	93
4.4	Évaluation du confort thermique par la méthode de Givoni dans configuration Initiale : mois type chaud	93
4.5	Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans configuration Initiale	94
4.6	Influence des paramètres d'entrée sur la période d'inconfort dans le cas d'un bâtiment en évolution libre	97
4.7	Co-simulation EnergyPlus et Dymola via FMI	101
4.8	Comparaison des deux configurations du toit	102
4.9	Illustration des solutions passives pour le cas de toiture simple . . .	102

Table des figures

4.10	Impact des solutions non-architecturales sur la température du toit	103
4.11	Impact des solutions non-architecturales sur la température de l'air dans la zone	104
4.12	Illustration des solutions passives pour le cas de comble	105
4.13	Impact des solutions non-architecturales sur la température du plafond : cas du comble	106
4.14	Impact des solutions non architecturales sur la température de l'air dans la zone : cas du comble	107
4.15	Impact de la ventilation pour $H=0$	108
4.16	Impact de la ventilation la température du plafond :cas du comble .	109
4.17	Les débits de ventilation estimée pour $h=0,75m$	110
4.18	Les niveaux de lumière de jour	111
4.19	Modèle de la pièce	113
4.20	Estimation des apports solaires dans le cas de référence	114
4.21	Les heures d'éclairement utile simulées pour différents point de la pièce : cas référence	115
4.22	Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas référence Nord et Sud	116
4.23	Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas référence Est et Ouest	116
4.24	Impact d'un auvent de 0.5m de profondeur sur des fenêtres Sud et Ouest	117
4.25	Impact d'un flanc de 0,5m de profondeur sur des fenêtres Sud et Ouest	118
4.26	Impact d'une loggia de 0,5m de profondeur sur des fenêtres Sud et Ouest	118
4.27	Angles d'ombre vertical et horizontal	119
4.28	Impact de la loggia sur les apports solaires par rayonnement direct .	121
4.29	Le taux d'apports solaires évités dû à la loggia	122
4.30	Les heures d'éclairement utile simulées sur l'axe médian de la pièce : cas de la loggia	123
4.31	Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas de la loggia Est et Ouest	124
4.32	Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas loggia optimisée Nord et Sud	124
4.33	Estimation des apports solaires pour le cas des dimensions optimisées	125
4.34	Les UDI sur l'axe de l'ouverture : cas d'optimisation	126
4.35	Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas WFR Est et Ouest	127
4.36	Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas WFR Nord et Sud	127

4.37	Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : Tôle + $\alpha = 0,25$	130
4.38	Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : Tôle + <i>comble</i>	131
4.39	Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : Tôle + <i>comble</i> + $\alpha = 0,25$	132
4.40	Comparaison des différents cas de toiture	133
4.41	Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : l'ouverture vitrée 1,2mx1,2m	134
4.42	Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : des dimensions optimisées	135
4.43	Sensibilité des paramètres de l'enveloppe dans le cas d'une ambiance contrôlée	136
4.44	Caractérisation des heures d'inconfort pour le jour et la nuit	137
4.45	Caractérisation des heures d'inconfort pour l'année	138
A.1	Illustration du calcul de la composante direct de l'éclairement naturel	149
A.2	Coefficients et exposants empiriques pour le calcul de la vitesse du vent	151

Liste des tableaux

1.1	Répartition des ménages selon le mode principale d'éclairage en (%) INSD (Octobre 2007)	6
1.2	Typologie de structure selon la zone climatique, Zhai and Previtali (2010)	8
1.3	Population selon le milieu de résidence	13
1.4	Répartition des logements selon la nature du mur (%) (INSD, Oc- tobre 2007)	14
1.5	Répartition des logements selon la nature du toit (%) (INSD, Octobre 2007)	14
1.6	La vitesse du vent dans les principales stations météo du Burkina INSD (Octobre 2007)	17
1.7	Les extrema de température	17
3.1	Critères pour l'évaluation de la calibration	65
3.2	Propriétés thermo-physique des matériaux	70
3.3	Propriétés de surface des matériaux	71
3.4	Évaluation des critères de calibration du modèle de référence	73
3.5	Plage d'incertitude et valeurs des paramètres trouvées après optimi- sation des paramètres les plus influents du modèle	80
3.6	Les critères de validation après optimisation	81
4.1	Propriétés de surface des matériaux	100
4.2	Propriétés de verre clair utilisé	114
4.3	Optimisation des dimensions de l'ouverture et de la loggia	123
4.4	Les UDI moyens en fonction des cas évalués	123
4.5	Les différentes configurations étudiées	128
4.6	Impact de la taille des ouvertures sur le confort thermique	133
4.7	Réduction de l'énergie à extraire pour le refroidissement par rapport au cas de référence du comble	136
A.1	coefficient de rugosité	147

NOMENCLATURE

Abréviations	
Notation	Signification
BBCC	Building BioClimatic Chart
BPS	Building Performance Simulation
CV(RMSE)	coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne
CVC	Chauffage Ventilation Climatisation
FMI	Functionnal Mock-up Interface
FMU	Functional Mock-up Unit)
GPS	Generalized Pattern Search
HSA	Horizontal Shading Angle
HJ	Hooke-Jeeves
NMBE	l'erreur de biais moyenne normalisé
PSO	Particle Swarm Optimisation
TMY	Typical Meteorological Yea
UDI	Useful Daylight Index
VSA	Vertical Shading Angle
WFR	Window to Floor Ratio

Lettres minuscules		
Notation	Unité	Signification
t	h	Variable relative au temps
f	[-]	Facteur d'armotissement
e	$W.s(1/2)/(m^2.K)$	Effusivité thermique
d	m^2/s	Diffusivité thermique

Liste des tableaux

Lettres grecques		
Notation	Unité	Signification
ρ	$[kg.m^{-3}]$	Masse volumique
λ	$[W.m^{-1}.K^{-1}]$	Conductivité thermique
α	[-]	Absorptivité Solaire
ε	[-]	Emissivité infrarouge
ϕ	h	Déphasage

Lettres Majuscule		
Notation	Unité	Signification
C	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$	Chaleur spécifique
C_p	[-]	Coefficient de pression
F_c	[-]	La fonction objectif
T_A	$[^{\circ}C]$	Température du plafond : cas comble de référence
T_{A-zwc}	$[^{\circ}C]$	Température de l'air dans zone : comble + surface réfléchissante
T_{Awc}	$[^{\circ}C]$	Température du plafond : comble + surface réfléchissante
T_{A-zins}	$[^{\circ}C]$	Température de l'air dans la zone : comble + isolation
T_{Ains}	$[^{\circ}C]$	Température du plafond : Comble + isolation
T_{A-zrad}	$[^{\circ}C]$	Température de l'air dans la zone : Comble + barrière radiante
T_{Arad}	$[^{\circ}C]$	Température du plafond : Comble + barrière radiante
T_{zwc}	$[^{\circ}C]$	Température de l'air dans la zone : cas de la surface réfléchissante
T_{wc}	$[^{\circ}C]$	Température de la toiture : cas de la surface réfléchissante
T_{ins}	$[^{\circ}C]$	Température de la toiture : cas de l'isolation
T_{zins}	$[^{\circ}C]$	Température de l'air dans la zone : cas de l'isolation
T_{zrad}	$[^{\circ}C]$	Température de l'air dans la zone : cas de la barrière radiante
T_{rad}	$[^{\circ}C]$	Température de la toiture : cas barrière de la radiante
T_{ref}	$[^{\circ}C]$	Température de la toiture : cas de référence
Q	[ACH]	Température de la toiture : cas de référence
D_v	[DH]	les degrés-heures de la ventilation pour le refroidissement
D_c	[DH]	les degrés heures de refroidissement par climatisation
D_R	[DH]	les degrés heures de chauffage

Indices	
Notation	Signification
Ee	Enduit extérieur
agg	Aggloméré de ciment
Ei	Enduit intérieur
T	Relatif au toit
Mi	Relatif à la face interne des murs
Me	Relatif à la face externe des murs
Te	Relatif à la face externe du toit
Ti	Relatif à la face interne du toit
fr	Relatif à la température d'évolution libre
opt	Relatif au cas optimisé
A	Relatif au comble
$A = 0.5m^2$	Relatif à une surface équivalente du comble égale $\tilde{A} = 0.5m^2$
$A = 1m^2$	Relatif à une surface équivalente du comble égale $\tilde{A} = 1m^2$

Introduction

La prise de conscience de l'épuisement des ressources énergétiques, l'augmentation des prix des énergies fossiles et le changement climatique ont provoqué un intérêt pour la maîtrise des consommations énergétiques en général et celles liées à l'énergie dans le bâtiment en particulier. Le secteur du bâtiment consomme environ 40% de l'énergie mondiale, et compte pour environ 1/3 des émissions des gaz à effet de serre dans le monde¹. Les bâtiments des secteurs résidentiels et tertiaires consomment environ 60% de l'électricité mondiale.

Dans les pays en voie de développement, le taux d'urbanisation jusqu'à là, faible augmente rapidement et les besoins en nouveaux bâtiments sont élevés. Selon l'ONU-HABITAT, le taux de croissance des villes passera de 47% en 2011 à 65% à l'horizon 2050 (HABITAT, 2014) dans ces régions. Sur le plan énergétique ces pays en général et particulièrement ceux de l'Afrique, sont caractérisés par un taux d'accès à l'énergie faible et font face à un déficit de production. Ce déficit est accentué par le contexte énergétique mondial. Les espaces urbains présentent deux aspects quand il s'agit de la consommation énergétique. Dans certaines franges de la société, les revenus sont assez élevés, et les habitudes de consommation d'énergie sont similaires à celles des pays industrialisés. Pour les autres franges, qui constituent une grande part de la population, les modes de consommation sont similaires à ceux des zones rurales (consommation d'énergie de source traditionnelle).

Dans le domaine du bâtiment, cela se manifeste par une forte consommation énergétique dans les bâtiments publics et dans le résidentiel des classes privilégiées ou à des ambiances en inconfort thermique au niveau des classes moins nanties. Pour cette dernière classe, les bâtiments sont évolution libre c'est à dire sans systèmes énergétique et représentent une grande part du fait du contexte économique. Ce constat est accentué dans les régions où sévit le climat tropical humide et sec et l'absence de spécifications et réglementations sur le secteur du bâtiment qui leur soient propres (Iwaro and Mwashu, 2010; Janda and Busch, 1994). Les réponses apportées consistent le plus souvent en l'augmentation des capacités de production. Les mesures sur la limitation de la consommation sont peu développées. A ce contexte d'urbanisation rapide, on peut noter l'incapacité des technologies locales à répondre aux nouveaux besoins socio-culturels, qui a conduit à l'adoption des technologies des pays développés sans une prise en compte systématique du contexte énergétique et climatique. Ces contextes urbain et énergétique représentent des opportunités pour la démarche écologique et l'efficacité énergétique tant dans la conception que dans la rénovation. Construire durablement entraînera un environnement plus sain et plus productif. L'adaptation des constructions au contexte climatique dans les climats

1. ONU habitat (<http://unhabitat.org/urban-themes-2/>)

chauds est une nécessité si l'on veut améliorer les conditions de vie dans l'habitat et diminuer les risques qui pèsent sur l'état de santé et la productivité des occupants du fait de l'inconfort thermique dans les bâtiments et ceux évolution libre en particuliers. Cette adaptation passe par une meilleure connaissance des performances énergétiques de l'enveloppe du bâtiment et de ses composants. Cela nécessite le recours aux modèles numériques et aux outils de simulation qui constituent des moyens raisonnables, en termes de délai et de coût, pour analyser et comprendre le comportement des bâtiments et en améliorer les performances énergétiques que ce soit en phase de conception ou de vie.

La simulation dans le bâtiment a pour but d'imiter les conditions physiques réelles en utilisant des modèles mathématiques pouvant représenter tous les flux d'énergies ainsi que leurs interactions. Plusieurs efforts sont menés pour augmenter le niveau de confiance à l'égard des résultats de ces simulations. Les projets PASSYS² et IEA-BESTEST³ sont des projets à l'échelle internationale qui se sont intéressés à la validation des outils de simulation appliqués à la thermique du bâtiment. Modélisation et simulation sont devenues indispensables pour les acteurs du domaine de la conception et de l'exploitation des bâtiments (Wetter, 2011a; Sahlin et al., 2004, 2000; MacQueen, 1997; Clarke et al., 2004; Augenbroe et al., 2004). Les récentes avancées permettent d'avoir des outils performants, des codes validés, des possibilités de couplage et des méthodologies permettant de simuler de façon globale le comportement du bâtiment.

C'est dans ce contexte que s'insère cette étude. Les motivations de ce travail sont en premier lieu la simulation thermique dynamique comme outils de diagnostic et d'aide à la conception des bâtiments passifs et de basse consommation énergétique dans le climat tropical en général et au Burkina Faso en particulier. Il s'agira d'approfondir les connaissances sur le comportement thermique des bâtiments conventionnels en évolution libre par l'expérimentation et la simulation d'une part, et d'autre part d'explorer des solutions passives permettant d'éviter les apports solaires dans l'environnement intérieur du bâtiment et par conséquent diminuer les heures d'inconfort.

Le premier chapitre de ce document fait une revue bibliographique et un diagnostic sur la situation de l'habitat en Afrique en général et au Burkina Faso en particulier. Il présente un rappel des différentes interactions entre le bâtiment et son environnement intérieur vis-à-vis de l'occupant, et enfin une revue des stratégies passives d'amélioration du confort d'été est réalisée.

Le second chapitre est consacré aux outils de simulation des performances énergétiques et met en évidence l'importance prise par ces derniers dans le processus de conception et d'évaluation des bâtiments. Il s'agira de faire l'état des lieux des ré-

2. Programme européen pour la caractérisation du comportement thermique des bâtiments (1986-1989 PASSYS I, 1989-1993 PASSYS II)

3. International Energy Agency-The Building Energy Simulation Tests

centes avancées dans le domaine de la simulation thermique dynamique du bâtiment et de justifier nos choix.

L'application de la simulation pour l'étude diagnostique des bâtiments existants fera l'objet de la troisième partie. Un modèle numérique de bâtiment est implémenté et les prédictions confrontées aux résultats de l'expérimentation menée sur un bâtiment type du Burkina Faso à travers un processus de calibration.

Une fois les conditions de validation remplies, le dernier chapitre mettra l'accent sur les solutions passives permettant d'améliorer le comportement thermique des composants du bâtiment par l'application d'outils de simulation comme aide à la conception. Les impacts sur l'environnement intérieur du bâtiment seront évalués à travers des études comparatives sur le confort thermique et les besoins de refroidissement.

Conception de bâtiments passifs en climat tropical

Sommaire

1.1	Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne . . .	5
1.1.1	Le contexte énergétique et efficacité énergétique	5
1.1.2	Habitat, énergie et climat : évolution en Afrique	7
1.2	Les interactions entre le bâtiment et son environnement .	16
1.2.1	Le climat du Burkina Faso	16
1.2.2	Soleil et bâtiment	20
1.2.3	Les échanges thermiques dans le bâtiment	21
1.2.4	Caractérisation du confort thermique	23
1.2.5	La conception bioclimatique	30
1.3	Le refroidissement passif de l'habitat	32
1.3.1	Techniques de protections solaires	32
1.3.2	Les techniques de dissipation de la chaleur et la ventilation naturelle	35
1.4	Conclusion	38

1.1 Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne

1.1.1 Le contexte énergétique et efficacité énergétique

La part de l'Afrique dans la population urbaine mondiale va quasiment doubler entre 2010 (11,3%) et 2050 (20,2%) selon les prévisions de l'ONU ([HABITAT, 2014](#)). Les grands établissements humains en Afrique sub-saharienne sont actuellement confrontés à la nécessité d'accroître leur production d'énergie pour accélérer le développement et améliorer le niveau de vie de leurs populations, dans un contexte de changement climatique et de flambée des coûts des énergies fossiles. Avec 14% de la population mondiale, l'Afrique ne consomme que 3,2% de l'énergie utilisée dans le

monde¹. La capacité installée de la plupart des pays de l'Afrique sub-saharienne se situe entre 10 MW à 2000 MW à l'exception de l'Afrique du Sud avec plus de 40000 MW, le Nigeria avec plus de 5000 MW. En outre, seuls 14 des 53 pays africains (les cinq pays de l'Afrique du Nord et les huit pays de l'Afrique sub-saharienne) ont une capacité installée supérieure à 1000MW.

Au Burkina Faso, les ressources énergétiques sont limitées à de petites installations hydroélectriques. La ressource solaire abondante est faiblement exploitée. Sans ressources pétrolières nationales, le secteur de l'énergie repose fortement sur les importations des hydrocarbures. Les coûts de l'électricité représentent, en moyenne, 15% des dépenses totales des entreprises industrielles et commerciales (Ouedraogo, 2010). La production totale en 2007 était de 612 GWH. Toutefois, il convient de noter que cette production est insuffisante pour répondre aux besoins du pays en électricité.

En 2009, 14% des ménages du pays avaient accès à l'électricité, avec des disparités entre le milieu urbain (46 %) et le milieu rural (2%). Le taux d'accès à l'électricité était de 13,9% en 2009.

TABLE 1.1 – Répartition des ménages selon le mode principale d'éclairage en (%) INSD (Octobre 2007)

	année	Électricité	Pétrole	Torches	Bois	Autres
Burkina Faso	2003	10,4	71,2	13,2	4,3	1
	2005	12,7	66,7	14,6	4,5	1,5
	2007	14,3	63,6	15,6	3,1	3,5
Centre	2003	42,8	54,6	1	0,5	1,1
	2005	55,1	41,6	0,9	1,4	1
	2007	53,6	41,5	2,4	0,1	2,4

La Figure 1.1 présente la répartition des ménages selon le mode d'éclairage. A l'échelle du pays l'éclairage artificiel avec l'électricité est un luxe. Au niveau de la région du centre qui est la plus développée l'accès à l'énergie n'est pas totalement effectif. Dans un tel contexte les actions d'économie d'énergie sont vécues comme moins prioritaires que les investissements sur les installations de production, dont l'insuffisance est criante. Les institutions qui mettent en place les politiques d'efficacité énergétique ont peu de moyens et peu de légitimité.

Les pays en voie de développement de l'Afrique sub-saharienne ont en général de faibles consommations d'énergie. Une véritable fracture sépare également le monde urbain du monde rural (Karekezi and Majoro, 2002). Alors que le relatif bon équipement des plus grandes villes permet l'accès aux sources d'énergie conven-

1. BP statistique report 2013

1.1. Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne

tionnelles, les infrastructures de distribution sont quasi-inexistantes dans les campagnes. L'évolution démographique des établissements humains (rurale et urbaine) et la croissance économique en cours devraient se traduire par une augmentation rapide de la consommation des ressources naturelles. Le secteur du bâtiment étant grand consommateur de ces ressources naturelles, une attention particulière doit lui être accordée. En effet, ce secteur peut être responsable de grande consommation énergétique principalement pendant la phase d'exploitation. Un regard sur l'habitat et le secteur du bâtiment au cours de l'évolution de l'Afrique est réalisé dans la section suivante.

1.1.2 Habitat, énergie et climat : évolution en Afrique

1.1.2.1 Regard sur l'habitat traditionnel

Toute analyse sur le rôle joué par l'énergie dans l'architecture est confrontée au manque de travaux dans la littérature en général et en particulier ceux qui s'intéressent au contexte des pays de l'Afrique sub-saharienne (Coch, 1998). Parfois, des déterminants culturels dominant et éclipsent les besoins de s'adapter au climat. Costa (1989) a observé que les bâtiments traditionnels au Nigeria ont été influencés par des facteurs socioculturels. Dans l'architecture vernaculaire, le climat est tout simplement un facteur de plus parmi tant d'autres (socio-culturel, économique, de défense ou religieux, ou impliquant la disponibilité du matériau, des ressources techniques et constructives, etc.) qui entre en ligne de compte dans l'architecture (Coch, 1998).

C'est dans des conditions de faiblesses technologiques que le climat joue le rôle principal dans les solutions utilisées. Coch (1998) note qu'en général, plus les conditions climatiques sont extrêmes, plus limitées sont les solutions. Cependant, elle précise que la réalité ne fonctionne pas de cette manière, et dans une seule et même zone, avec des conditions climatiques données, on peut trouver plusieurs solutions qui résolvent les mêmes problèmes climatiques par des méthodes différentes. C'est le cas dans les zones désertiques, où l'architecture souterraine de certaines populations sédentaires contraste avec la légèreté des abris et des tentes d'autres peuples nomades. Dans certains cas les effets du rayonnement solaire sont évités d'une part par des moyens tels que l'inertie thermique et l'obscurité, et d'autre part avec des protections solaires et la ventilation naturelle nocturne. De nombreuses cultures, préhistoriques, historiques et contemporaines, offrent des informations intéressantes sur la façon de concevoir avec le climat, y compris dans les conditions climatiques considérées extrêmes (Cook, 1996; Herde and A.Liébard, 1996-2004). Zhai and Previtali (2010) donne pour un échantillon de 114 types de constructions vernaculaires, la proportion de celles dont la structure et la toiture sont de types légère et lourde en fonction de la zone climatique considérée (Table 1.2 et figure 1.1). On peut no-

Chapitre 1. Conception de bâtiments passifs en climat tropical

ter que plus le climat devient chaud et humide, plus les matériaux de construction légers deviennent dominants dans l'enveloppe des bâtiments.

TABLE 1.2 – Typologie de structure selon la zone climatique, [Zhai and Previtali \(2010\)](#)

Zone climatique	Composition de parois
Polaire (E)	Légères 0 % /Massives 100 %
Océanique(Cf)	Légères 0 % /Massives 100 %
Méditerranéenne(C)	Légères 32 % /Massives 68 %
Aride (B)	Légères 26 % /Massives 74 %
Continentale (D)	Légères 58 % /Massives 42 %
Équatoriale (Af)	Légères 62 % /Massives 38 %
Tropicale (Aw)	Légères 100 % /Massives 0 %

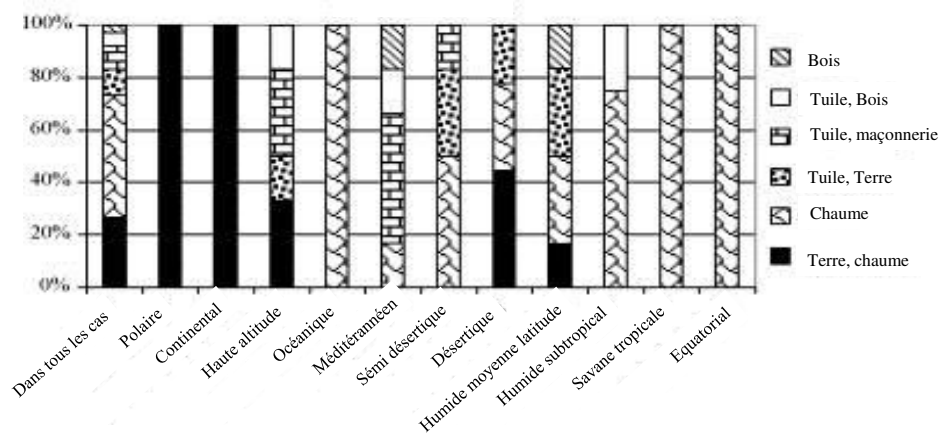


FIGURE 1.1 – Typologie de toiture selon la zone climatique, ([Zhai and Previtali, 2010](#))

Les pays de l'Afrique au Sud du Sahara se situent en grande majorité entre les tropiques du cancer et du capricorne. Dans ces régions, le climat qui prévaut est principalement le climat tropical (Humide et Sec). Dans ces sociétés traditionnelles, il n'y a pas de spécialistes de la construction : chacun opère pour soi suivant des techniques quasiment immuables, transmises de génération en génération. On rassemble les matériaux progressivement, puis au creux des travaux agricoles on les met en œuvre. Sous les tropiques, la chaleur diurne est sensée être la plus redoutée. Cependant, le froid des petits matins d'hiver est tout aussi redoutable et fait

1.1. Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne

apprécier un espace bien clos le cas échéant. Pendant la période de surchauffe, le confort thermique est assuré par la vie en plein air, sous l'ombrage d'un arbre ou d'un léger auvent. Dans les régions équatoriales, où le climat est plus doux avec peu de périodes chaudes, c'est la pluie et l'humidité qui sont des facteurs importants dans la conception de l'habitat, comme d'ailleurs dans la savane tropicale pendant l'hivernage. En Afrique il faut penser également à se protéger des bêtes sauvages et autres prédateurs (Brasseur, 1975). L'habitat servait aussi à protéger les biens, les effets personnels, et des réserves agricoles.

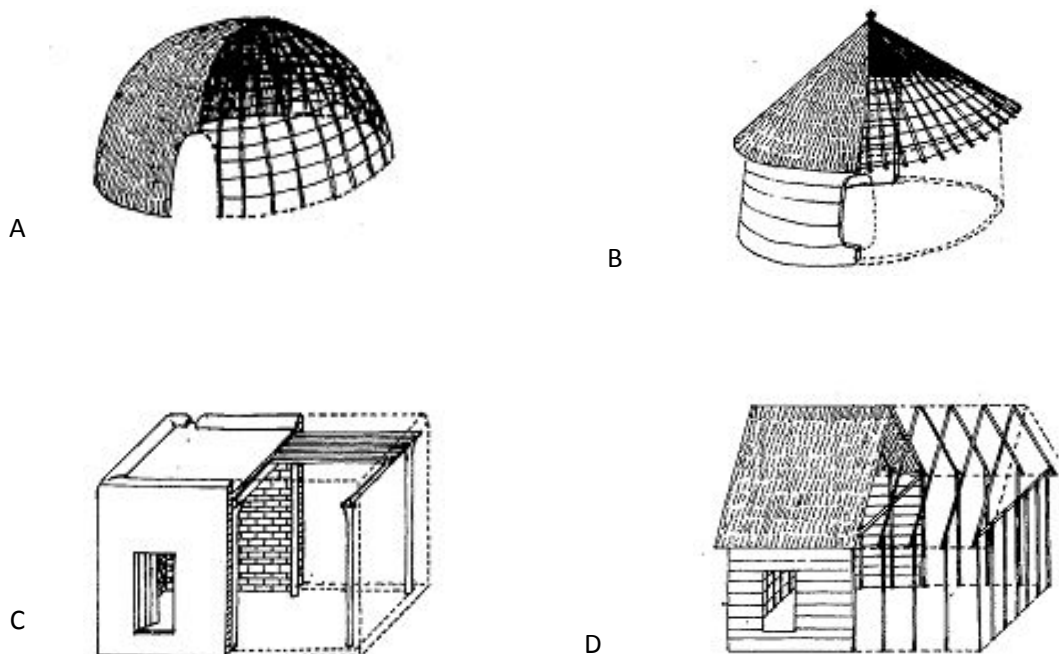


FIGURE 1.2 – Illustration habitat traditionnel Brasseur (1975) :A : La hutte nomade(parpaing creux) ;B : La case ronde ; C : La case à terrasse (BTC) ; D : La case rectangulaire de la forêt

Ces besoins ont conduit les populations vers le choix de matériaux adaptés au milieu. Au Sahel, les végétaux et les minéraux sont utilisés. La nécessité des déplacements fréquents conduit à simplifier au maximum les structures ainsi que le matériel de campement (Figure 1.2). Aux confins de la steppe et de la savane, le végétal est plus abondant et la construction d'une hutte devient facile avec des

branchages, la paille ou l'herbe disponibles. On retrouve également les murs en argile dans les cultures sédentaires. On l'utilise crue, après malaxage à l'eau. Les murs sont montés directement en façonnant la pâte molle à la main. On procède par étape afin de respecter le temps de séchage. Que ce soient les minéraux ou les végétaux, ils étaient vulnérables aux intempéries au fil des saisons d'où la nécessité de maintenance.

Les toits en voute sont plus fréquents que les toits plats. En effet dans les climats chauds et humides, les voûtes favorisent la stratification de l'air (Hadavand, Yaghoubi, and Emdad, 2008). Les toits plats apparaissent dans les constructions à plusieurs étages. Les matériaux pour la toiture comme la chaume grâce à leurs effets isolants permettent d'éviter les apports solaires. Comme le montre la Figure 1.1, ce type de matériaux est dominant dans l'architecture traditionnelle des climats chauds. Les grandes fenêtres sont rares dans l'architecture vernaculaire car les matériaux transparents (vitrage) n'étaient pas disponible. La majorité des logements vernaculaires en Afrique sub-saharienne ne dispose pas ou présente de petites fenêtres. L'obscurité est utilisée comme solution pour éviter les surchauffes et les matériaux transparents n'étaient pas utilisés.

Il faut noter qu'en règle générale les technologies traditionnelles du bâtiment ont montré leurs insuffisances pour faire face à la croissance démographique, à l'urbanisation et aux mutations socioculturelles, d'où l'adoption de matériaux et des techniques importés (on Human Settlements, 1993).

1.1.2.2 Regard sur l'habitat contemporain

Au cours de la période du 19^{ième} siècle, les Africains sont entrés en contact avec les styles et les matériaux de construction du monde occidental (Kisanga, 1990). L'administration coloniale avait des besoins en bâtiments pour les administrations et le résidentiel et a trouvé un style d'habitat et d'architecture non adapté à son style de vie. On a assisté à l'introduction de nouvelles technologies de constructions venant des métropoles. Pour l'ensemble des pays en développement dans le monde, la valeur totale des importations de matériaux de construction a augmenté, de 85% entre 1975 et 1985. En Afrique sub-saharienne ces importations ont augmenté de 36% (on Human Settlements, 1993).

L'impact des technologies de constructions importées a changé l'aspect des logements africains, ou du moins, les aspirations de logement, de deux façons (Moriarty, 1979) : d'une part dans le choix des matériaux de construction et, d'autre part, dans la forme et la structure de l'habitat. Cela a eu pour conséquence une modification du comportement des occupants dans les bâtiments.

1.1. Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne

1.1.2.2.1 Les matériaux de construction

Les blocs de béton, fabriqués à partir de sables alluvionnaires ou de latérite, ont été introduits pour leur résistance à l'eau, leur faible coût, et la possibilité qu'ils ont d'être produits localement (Costa, 1989). Concernant la toiture le même constat ressort. La construction du toit, était expéditive sauf pour la hutte habillée de nattes tressées. Pour les toitures terrasses (toiture lourde), la construction est plus complexe. Celles-ci demandent des poteaux ou des piliers de soutènement pour l'ossature, un colmatage et un crépi soigneux pour assurer l'étanchéité. Ces types de construction semblent laisser la place à la toiture métallique et aux tuiles dont le savoir-faire est importé des pays développés.

Dans l'architecture traditionnelle on observait très peu d'ouverture à destination de fenêtres. De nos jours la fenêtre et les composants d'enveloppe transparents ont été adoptés. Cependant, le coût élevé du verre limite son utilisation dans les zones rurales et par une grande part de la population urbaine. Ainsi on rencontre des fenêtres en verre et sans verre (des écrans en acier ou en bois pour couvrir l'ouverture). Au Nigeria, Ajibola (1997) note que les fenêtres ne répondent aux attentes de confort thermique en taille et en positionnement. Sur la Figure 1.3 D, on peut observer l'utilisation de baies vitrées pour un bâtiment administratif à Ouagadougou.

Les spécifications dans le secteur proviennent des pays développés, malgré la différence du contexte climatique. La durabilité de ces nouveaux matériaux donne au bâtiment une durée de vie élevée, et leurs résistances permettent de construire en plusieurs niveaux facilitant ainsi une meilleure gestion des espaces. Ces matériaux de construction comme le métal et le ciment ont un impact énergétique plus élevé.

1.1.2.2.2 Concernant la forme des bâtiments

L'impact des technologies importées se manifeste aussi par l'évolution vers la conception rectiligne de logements. Le style, la morphologie et la disposition des maisons ont été impactés. Ajibola (2001) note que dans ces régions, les bâtiments modernes semblent être des répliques de bâtiments des pays européens dans la forme et la structure malgré des différences climatiques.

La morphologie des logements a changé : par exemple, la cabane traditionnelle de forme hémisphérique a cédé la place à la construction rectiligne. Le matériau terre en argile dans sa forme rustique en boules ou en bandes découpées, est dans sa forme moderne, des briques parallélépipédiques (Moriarty, 1979). Pour Moriarty (1979) la raison de l'abandon des formes hémisphériques est la nécessité d'adapter la structure à la tôle métallique qui est le matériau le plus adopté par la population.

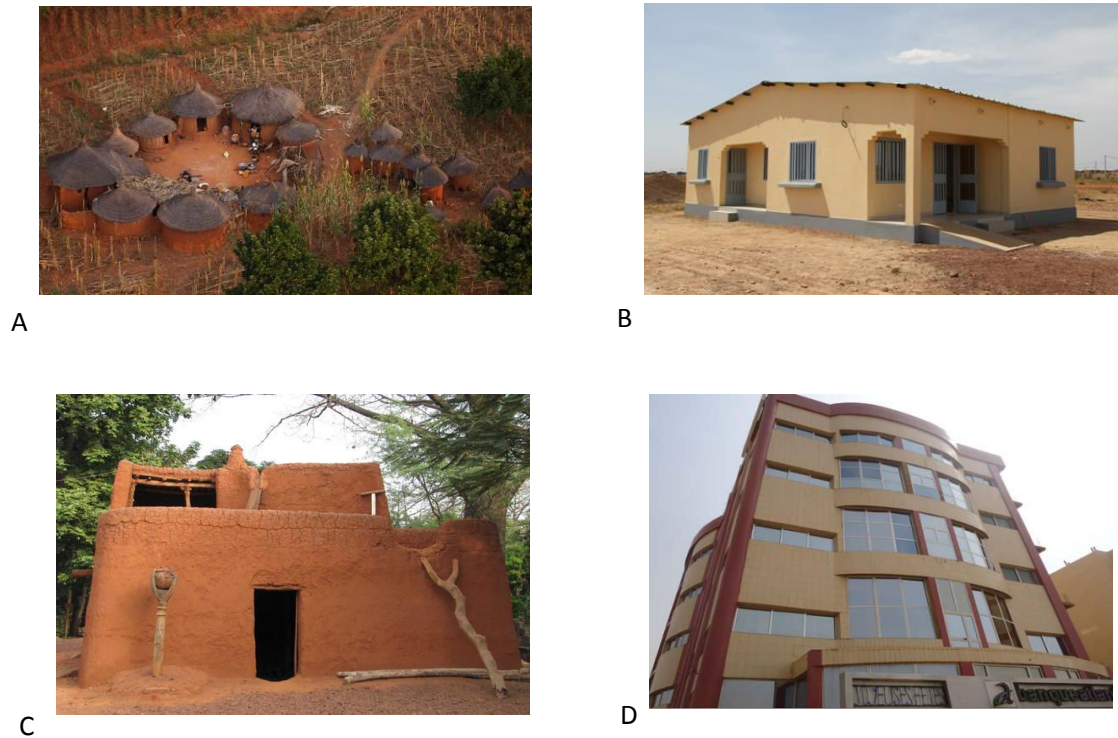


FIGURE 1.3 – Mutations dans le secteur du bâtiment : A-C bâtiments traditionnels ; B-D bâtiments modernes

1.1.2.2.3 L'occupation de l'habitat

Une autre différence entre l'habitat traditionnel et contemporain africain provenant d'une influence extérieure est la disposition et l'exploitation actuelle des bâtiments. Dans l'habitat de type moderne en Afrique toutes les pièces sont placées sous un même toit. Pour un climat froid cette configuration est justifiée car la perte de chaleur est réduite en minimisant la zone de paroi externe. La chaleur produite par les activités des occupants peut être utilisée pour chauffer l'ensemble de la maison. Mais cela peut ne pas être pertinent dans les climats chauds lorsque que l'on prend en compte le métabolisme de l'occupant et les charges internes que requiert la vie moderne. En général, dans les climats chauds et humides un logement était composé de plusieurs bâtiments (pièces indépendantes) permettant une ventilation maximale. Cependant, le coût élevé des matériaux modernes sera un fort argument pour regrouper toutes les pièces sous un même toit, permettant des économies sur la construction du mur extérieur. La salle de séjour "living room" qui, dans l'habi-

1.1. Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne

tat traditionnel n'existait pas, apparaît entre quatre murs (Moriarty, 1979). Cela illustre encore une fois, une adaptation raisonnable à un climat froid transféré des climats tropicaux. Le besoin de contrôler les espaces intérieurs en termes de confort apparaît. Des systèmes énergétiques comme la climatisation et la ventilation sont alors utilisés pour couvrir les besoins de confort thermique dans les ambiances intérieures. Très vite les bâtiments publics et le résidentiel d'une frange de la population en ville, sont devenus de grands consommateurs d'énergie. La frange pauvre de la population, dont les aspirations du logement décent ont changé vivent dans le stress thermique.

1.1.2.3 Le secteur du bâtiment au Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays faiblement urbanisé, mais fait face à un fort taux d'accroissement des aires urbaines. En deux décennies la population des zones urbaines a triplé pendant que la population totale a doublé (Figure 1.3). Dans les villes, l'habitat est en pleine mutation, passant du type traditionnel au type moderne du fait de l'introduction de nouveaux matériaux et techniques de construction.

TABLE 1.3 – Population selon le milieu de résidence

	1985	1996	2006
Milieu rural	6 912 367	8 711 441	10 835 295
Milieu urbain	1 052 338	1 601 168	3 181 967
Burkina Faso	7 964 705	10 312 609	14 017 262

Les tableaux 1.4 et 1.5 montrent l'étendue de l'utilisation des matériaux modernes au Burkina en comparaison aux matériaux traditionnels. Évidemment les matériaux modernes sont plus répandus dans les zones urbaines, où les revenus sont plus élevés que dans les zones rurales. Cependant, on peut noter que l'utilisation des matériaux provenant de la construction traditionnelle (utilisation des matériaux traditionnels sans le savoir-faire vernaculaire) est encore élevée. Cela est dû aux moyens financiers limités qui conduit une grande partie de la population à adopter la tôle (matériau moderne le moins cher) tout en gardant une maçonnerie en matériau traditionnel.

Les principaux éléments de maçonnerie sont les suivantes :

- La brique alvéolée de ciment communément appelé parpaing. Il peut être confectionné facilement par les acteurs sur le site de la construction, ce qui évite tout acheminement coûteux. Le ciment permet d'avoir un bâtiment qui ne se détériorera pas dans le temps à cause des intempéries. Il est très résistant et apprécié pour sa facilité de pose.

TABLE 1.4 – Répartition des logements selon la nature du mur (%) (INSD, Octobre 2007)

	Année	Terre	Pierre	Ciment	Paille	Autr
Burkina Faso	2003	83	0,9	11,4	3,5	1,1
	2005	80,6	0,4	14,6	2,3	2,1
	2007	80,6	0,9	14,9	2,1	1,4
Centre-Nord	2003	90,3	0	3,7	6	0
	2005	83,1	0	3,9	11,2	1,8
	2007	86,9	0,2	6	5	1,9

TABLE 1.5 – Répartition des logements selon la nature du toit (%) (INSD, Octobre 2007)

	année	Paille/bois	Tôle	Terre	Autre
Burkina Faso	2003	30,2	41,1	27,8	0,9
	2005	26,5	45,7	26,9	0,9
	2007	27,1	48,6	22,6	1,6
Centre	2003	5,5	92,2	0,6	1,7
	2005	2,2	94,8	0,1	2,9
	2007	3,2	90,9	1,2	4,8

1.1. Énergie, habitat et climat en Afrique sub-saharienne

- La brique d'adobe est une brique de terre moulée (dans un moule en bois) à la main et séchée à l'air quelques jours. La maison conventionnelle, avec des murs d'adobe et une toiture en tôle se fait systématiquement sans fondations et sans mesures de protection du pied du mur. Cette négligence introduite lors d'une étape de modernisation engendre des maisons en adobe moins durables. 49% des ménages urbains et 92% des ménages ruraux habitent dans des maisons en murs d'adobe.

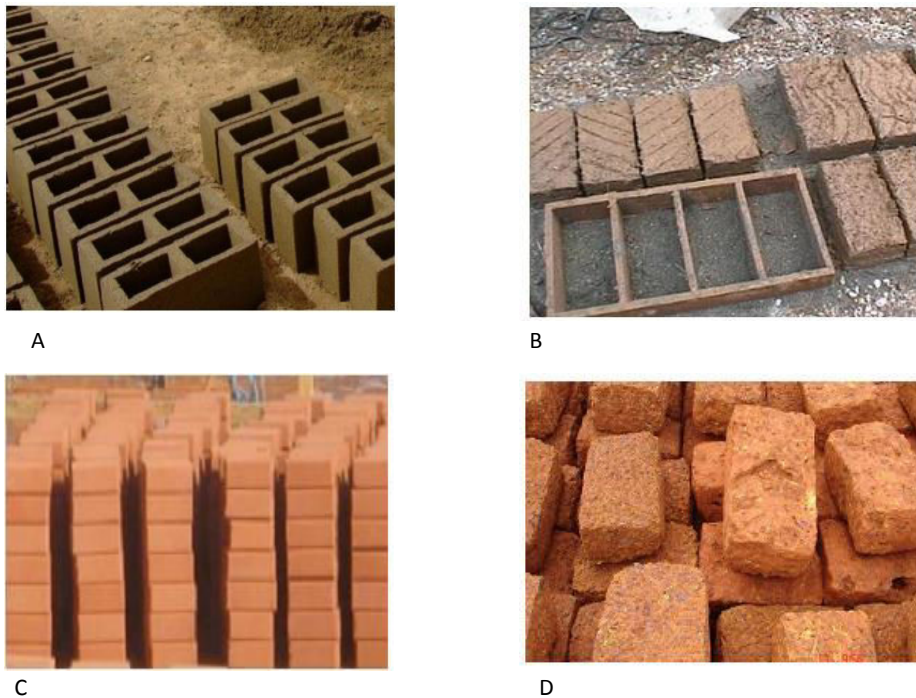


FIGURE 1.4 – Les éléments de maçonnerie courants :A : Aggloméré de ciment(parpaing creux) ; B : Brique en terre crue (Banco) ; C : Blocs de terre comprimée (BTC) ; D : Blocs de latérites taillées (BLT)

- Les BTC (Les blocs de terre comprimée) sont obtenus par le compactage dans une presse d'une terre latéritique adéquate pour donner un bloc régulier aux arrêtes vives. L'ajout d'un stabilisant (ciment, chaux ou bitume) rend les BTC résistants à l'abrasion et moins sensibles aux effets érosifs de l'eau. Le compactage leur permet d'acquérir la résistance mécanique nécessaire à leur utilisation.
- Les blocs de latérites taillés (BLT) sont extraits des nombreuses carrières de latérites disponibles au Burkina Faso. La latérite est une roche rouge ou brune qui se trouve sur des sols riches en fer et en aluminium dans les régions tropicales humides.

Au Burkina Faso, la majorité des bâtiments sont en terre avec une toiture en tôle. Pour les grandes villes les logements sont dans leur majorité en parpaing de ciment surmontés de toitures en tôles. Peu d'études ont été réalisées sur les propriétés thermiques et mécaniques des matériaux locaux que sont les BLT et les BTC. Cela entraîne une méconnaissance du produit. Pourtant, vu son accessibilité, c'est une alternative intéressante au parpaing de ciment et à l'adobe. Les matériaux locaux souffrent aussi d'un déficit d'image positive. L'absence de technique, de réglementation et de principes sur l'éco-construction ne contribue pas à émergence de ces matériaux.

Le principal mode de production du logement est l'auto-financement avec plus de 90% des cas. Dans notre contexte l'auto-construction renvoie au fait que les ménages sont propriétaires de leur logement et financent directement sa construction. Le désengagement de l'État du domaine durant les deux dernières décennies de la production directe de logement a entraîné l'apparition d'acteurs privés de promotion immobilière et foncière.

1.2 Les interactions entre le bâtiment et son environnement

1.2.1 Le climat du Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays enclavé d'une superficie de 274 200 km² situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest. Selon la classification des climats de Koppen-Geiger (Kottex et al., 2006), le Burkina Faso est traversé par trois zones climatiques.

- Dans la partie Nord du pays (au nord du 14^{ième} parallèle), le climat est de type désertique (BWh). Dans cette zone aussi appelé sahélienne qui couvre 25% (SP/CONAGESE, 2001) de la superficie du pays, la pluviométrie y est inférieure à 600 mm, la durée de la saison sèche varie de 8 à 9 mois.
- Au centre du pays (entre le 13^{ième} et 14^{ième} parallèle), un climat de steppe (Bsh) appelé aussi la zone sub-sahélienne (ou soudano-sahélienne) prévaut. Il est caractérisé par une pluviométrie comprise entre 600 et 900mm. Ce climat couvre la zone la plus vaste du pays et la saison sans pluie dure 7 à 8 mois par an ;
- La partie Sud est couverte par un climat de savane avec un hiver sec de type Aw. La saison sans pluie dure 6 à 7 mois par an.

L'ensoleillement moyen est de 300 jours par an et la variation climatique oscille en moyenne entre 16 °C et 41 °C à l'ombre (Tableau 1.7).

Les températures moyennes restent comprises entre 28°C et 42°C. Mais les maxima absolus peuvent parfois atteindre 46°C. La Figure 1.7 présente une répartition des températures sur toute l'année à Ouagadougou. On observe que les tempé-

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

TABLE 1.6 – La vitesse du vent dans les principales stations météo du Burkina
INSD (Octobre 2007)

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Bobo Dioulasso	2,7	3,1	3,3	3,4	3,1	3,2	3,1	3	3,1	3,2
Dedougou	2,6	2,7	2,2	2,1	1,8	1,9	2	2,8		2,8
Dori	1,2	1,5	1,6	1,5	1,3	1,4	1,2	1,3	1,3	0,9
Fada N’Gourma	1,3	1,2	1	1,3	1,8	1,8	1,1	1,3	1,4	1
Ouagadougou	2,4	1,5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,6	2,7	2,7
Ouahigouya	2,3	2,3	2,3	2,4	2,1	2,6	2,2	2	2	2
Po	1,1	1,3	1,3	1,2	1,1	1,2	1,5	1,6	1,6	1,6

TABLE 1.7 – Les extrema de température

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
température moyenne maxima	35,4	35,6	35,5	35,4	35,5	35,5	35,7	35,4
mois le plus chaud	avril	avril	avril	avril	avril	avril	avril	avril
température mensuelle maxima	40,8	40,9	40,1	40,1	38,8	40,4	40,6	39,1
température moyenne minima	22,3	22,4	22,8	22,7	22,9	23,5	22,7	22,9
mois le moins chaud	dec	janv	janv	dec	janv	dec	dec	janv
température mensuelle minima	16,7	15,7	17,3	17	17,9	17,9	16,5	16,5

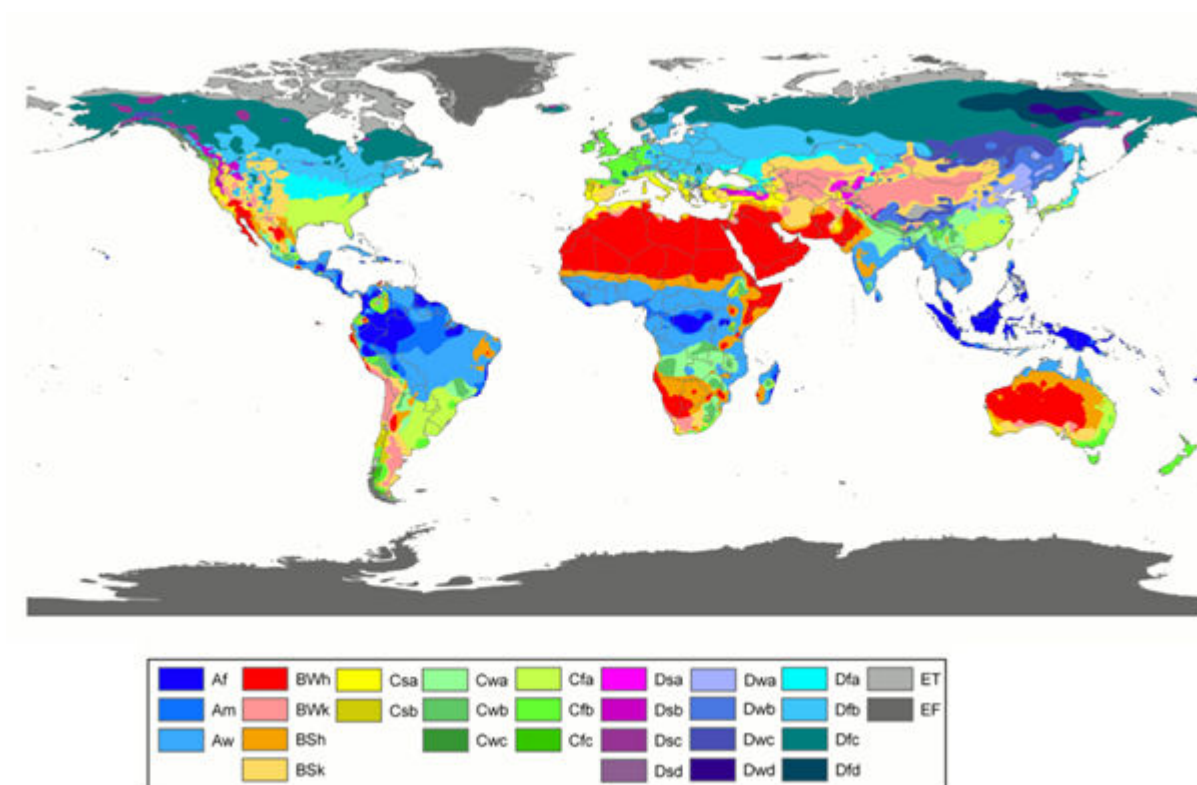


FIGURE 1.5 – Classification climatique de KoppenGigger

ratures comprise entre 24 et 38°C sont les plus fréquentes dans cette région. Les mois les plus chauds se démarquent par les proportions de températures supérieures à 38°C. Elles atteignent leurs fortes valeurs en Mars, Avril puis en Octobre, et les plus faibles en Décembre Janvier et Février. Les valeurs les plus fortes et les plus faibles se rencontrent dans la partie Nord du pays donnant des amplitudes thermiques diurnes, mensuelles et annuelles élevées.

La Figure 1.8 montre la répartition de l'humidité relative tout au long de l'année pour le cas de Ouagadougou. Sur l'ensemble du territoire et pour toute l'année, les plus faibles valeurs de l'humidité relative de l'air se situent entre Novembre et Février, tandis que les plus fortes valeurs se rencontrent entre Mai et Septembre avec un pic en Août pendant les saisons pluvieuses où elles sont supérieures à 60%. Mais globalement l'humidité de l'air reste supérieure à 10% toute l'année. La vitesse moyenne des vents est présentée dans le tableau 1.6 pour les principales stations météo du pays. La Figure 1.9 présente les intensités et les provenances des vents. Le pays est balayé par des vents dominants chauds de secteur Nord-est générés par l'Harmattan venant du désert et les alizés, vents humides, dus à la mousson, à l'origine des pluies venant du Sud (Figure 1.9). Les vents sont relativement faibles

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

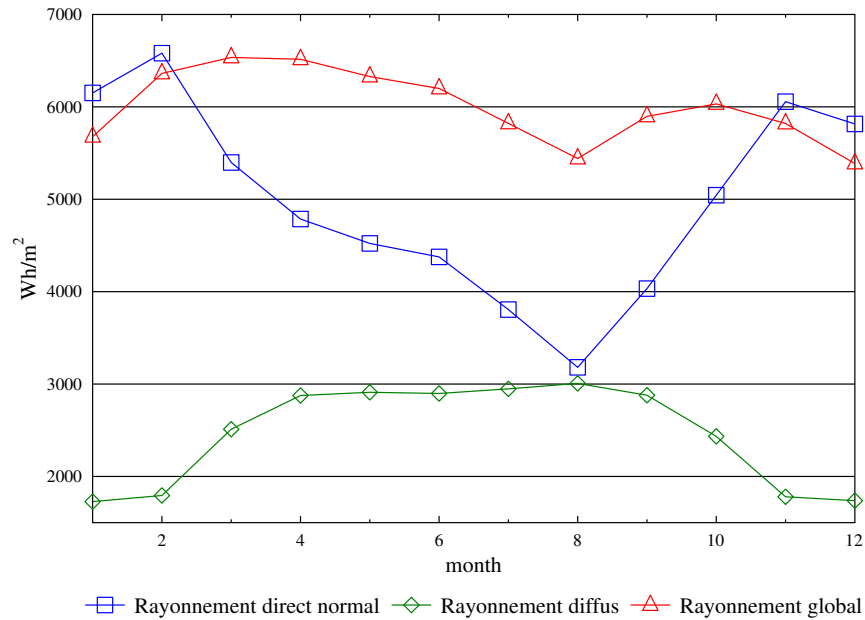


FIGURE 1.6 – Ensoleillement global, diffus and direct de Ouagadougou

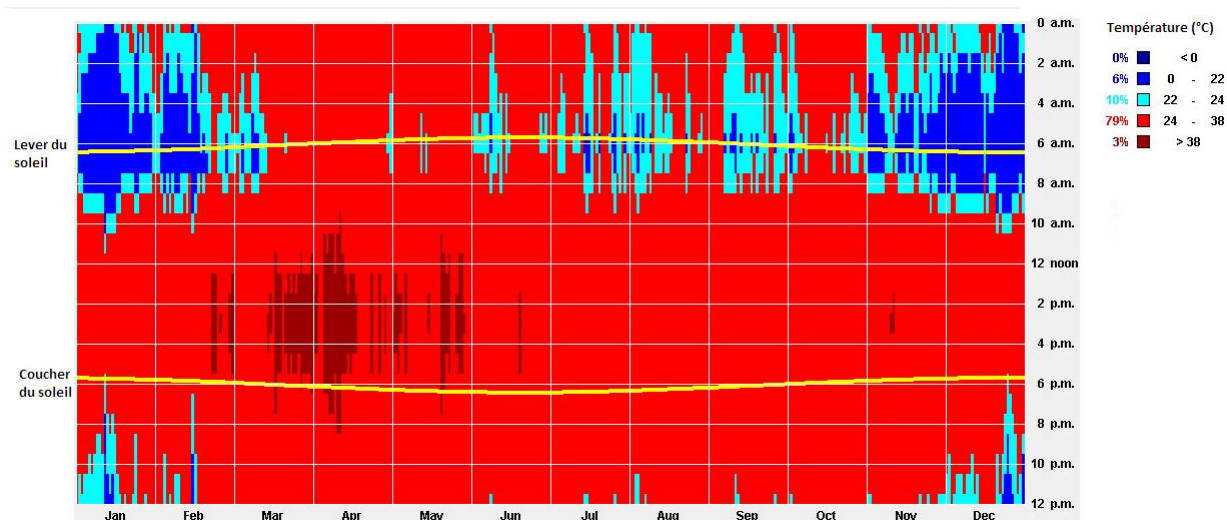


FIGURE 1.7 – Analyse des températures du fichier TMY (Climate consultant)

(2 m/s) sauf en début et en fin de saison de pluies où ils peuvent atteindre des vitesses de 120 km/h pendant les manifestations pluvieuses.

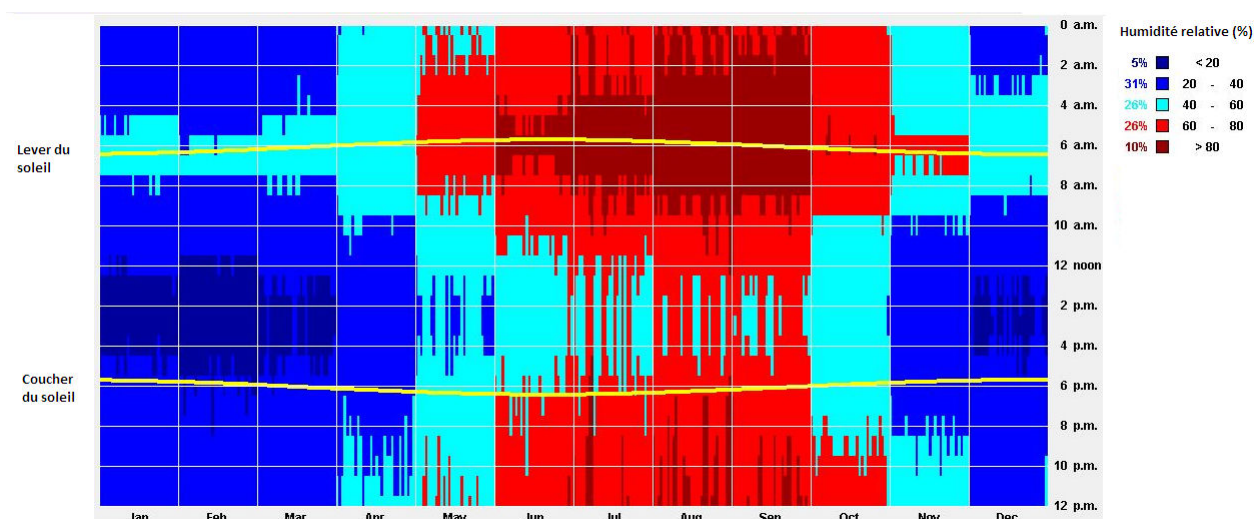


FIGURE 1.8 – Analyse des humidités relatives du fichier TMY (Climate consultant)

1.2.2 Soleil et bâtiment

Le soleil constitue notre source énergétique fondamentale. Les caractéristiques du système solaire soumettent la terre à des variations saisonnières affectant l'évolution de l'ensoleillement et des températures. Le soleil, rayonne à environ 6000K. Il émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Les longueurs d'onde dans lesquelles le maximum d'énergie est émis recouvrent le visible et l'InfraRouge (IR). Le rayonnement recouvre à la fois les aspect lumineux (éclairage lumineux) et énergétiques (rayonnement solaire). La constante solaire de 1353 W/m^2 est l'énergie atteignant une surface normale aux rayons solaires dans les couches supérieures de l'atmosphère. L'effet de la traversée de l'atmosphère qui réfléchit, absorbe ou diffuse le rayonnement solaire réduit considérablement cette valeur (Figure 1.10).

Ainsi à la surface de la terre, le rayonnement solaire comprend : 5% d'UV, 40% de lumière visible et 55% d'IR porteurs essentiels de l'énergie thermique. Au niveau de l'IR on distingue les courtes des grandes longueurs d'onde. Une fois émis par le soleil, le rayonnement atteint la surface des corps et subit suivant leurs propriétés de surface certaines transformations.

La densité de flux solaire incident au niveau d'une paroi, provient de trois composantes : la composante directe, la composante diffuse et la composante réfléchiée. La composante directe correspond au flux solaire qui atteint directement la paroi quand celle-ci est exposée au soleil. Elle dépend de la hauteur du soleil (réduction atmosphérique) et de l'angle d'exposition de la paroi au soleil à l'instant considéré.

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

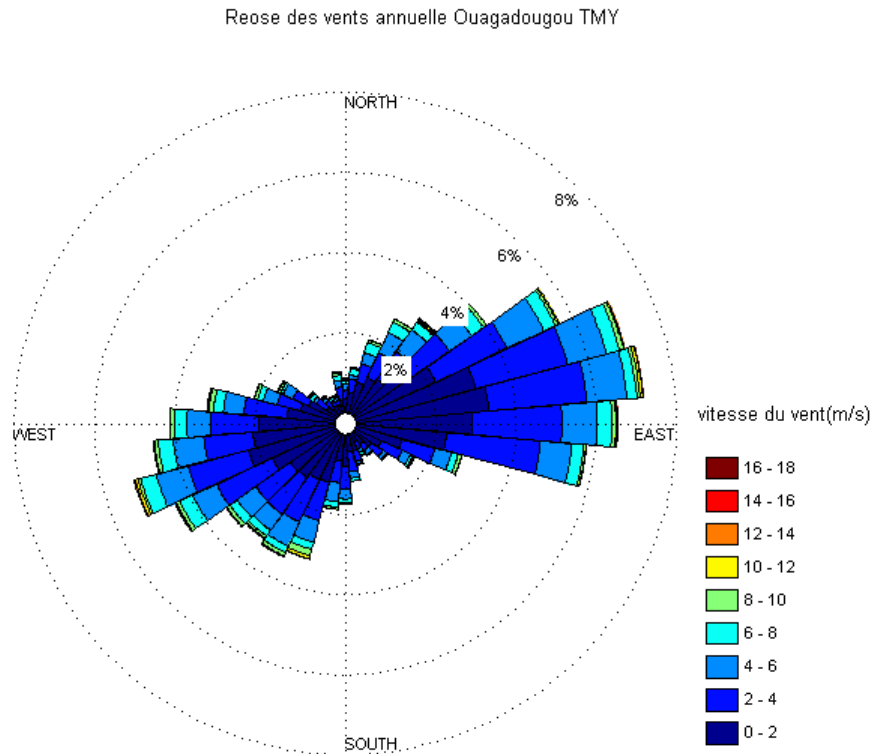


FIGURE 1.9 – Rose des vents de la ville de Ouagadougou

1.2.3 Les échanges thermiques dans le bâtiment

Du point de vue physique le bâtiment est une masse et un volume. La masse (parois opaques et transparentes) constitue le lien entre le microclimat intérieur et les fluctuations des sollicitations climatiques. La morphologie, l'orientation, et l'organisation des espaces caractérisent les modalités des interactions et transferts d'énergie entre l'intérieur et l'extérieur. Les transferts d'énergie sont essentiellement des transferts de masse et de chaleur. Les principaux modes de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement. Les transferts de masse concernent la chaleur latente mettant en jeu le changement de phase.

Les échanges thermiques par conduction interviennent au niveau des parois opaques et transparentes. Les propriétés thermo-physiques (Conductivité thermique, masse volumique et capacité calorifique) interviennent dans ce mode d'échange thermique.

La diffusivité d et l'effusivité thermiques e donnent une information importante sur la transmission de la chaleur à l'échelle d'un matériau. L'effusivité ($W.s(1/2)/(m^2.K)$)

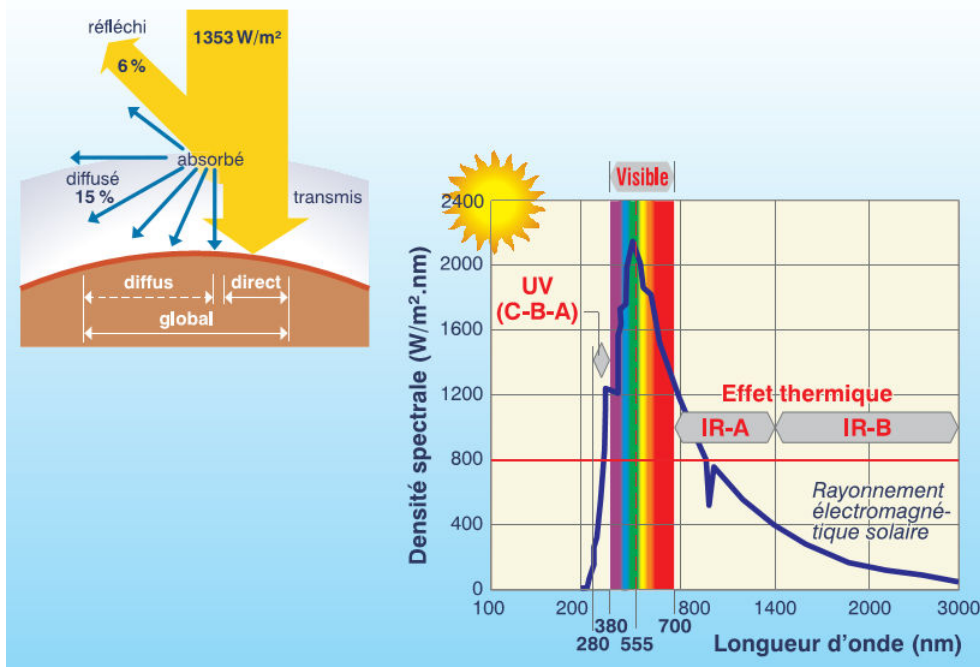


FIGURE 1.10 – Spectre du soleil (Herde and A.Liébard, 1996-2004)

est la capacité d'un matériau à absorber l'énergie et la restituer tandis que la diffusivité thermique (m^2/s) décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau.

$$e = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot C} \quad (1.1)$$

$$d = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \quad (1.2)$$

Avec : ρ : la masse volumique ; λ : la conductivité thermique ; C : la chaleur spécifique.

Concernant les échanges par rayonnement, le flux solaire incident sur une paroi est, à son tour, réfléchi, absorbé et transmis, suivant les caractéristiques de surface de la paroi (réflectivité, absorptivité, transmittivité). Le flux solaire réfléchi dépend du facteur de réflexion solaire de la surface ou du matériau de la paroi, son albédo (ou réflectivité). Il est essentiellement lié à la couleur ; le noir ne réfléchit rien, le blanc réfléchit tout. Le flux solaire absorbé dépend du facteur d'absorption solaire de la surface. Dans le cas d'une paroi opaque, le coefficient d'absorption "absorptivité solaire" vaut $1 - \text{albédo}$. Le flux transmis ne se produit qu'avec les parois transparentes. Le facteur de transmission au direct décroît rapidement dès lors que l'angle d'incidence devient important. Le rayonnement solaire absorbé par la paroi se transforme en chaleur et élève la température de surface de la paroi. La paroi échange alors avec son environnement suivant les trois modes fondamentaux

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

d'échanges, par conduction à l'intérieur de la paroi, par convection avec l'air environnant et par rayonnement vers les parois voisines. Cette énergie rayonnée par une paroi vers les autres parois est caractérisée par les propriétés émissives des matériaux "émissivités". Dans le cas des matériaux transparents, la part du flux transmis suit sa course vers les parois intérieures des bâtiments. La part visible de ce flux transmis assure l'éclairage naturel dans le bâtiment tandis que la part IR est absorbée par les parois internes.

Les systèmes de refroidissement ou de chauffage assurent au besoin la mise en confort thermique de l'ambiance intérieure selon des critères fixés par les occupants. Ces systèmes énergétiques peuvent conduire à des consommations d'énergie exagérées dans les bâtiments si le contexte climatique n'est pas pris en compte. L'enjeu de la conception des bâtiments consiste alors à composer avec la dynamique climatique de l'environnement pour limiter les gains et les pertes d'énergie en fonction des besoins des occupants. A cela on peut ajouter les besoins de confort visuel. En effet un grand nombre de bâtiments en Afrique sub-saharienne est évolution libre (sans équipements de chauffage et de climatisation) à cause du contexte énergétique (taux d'électrification faible) et de la pauvreté matérielle des populations. Dans ce contexte les équipements d'éclairage artificiel peuvent avoir une facture énergétique non négligeable dans le cas des bâtiments en évolution libre et l'éclairage naturel doit être pris en compte dans la conception des composants du bâtiment. Dans la section suivante nous traiterons de la notion du confort. En effet le confort est une notion globale : chaleur et froid, lumière, bruit, paysage, eau, verdure, prestige et autre, qui sont autant d'éléments définissant plusieurs paramètres climatiques, esthétiques, psychologiques du confort. Au regard des conditions climatiques qui caractérisent notre contexte d'études nous allons développer dans les lignes qui suivent la notion de confort thermique.

1.2.4 Caractérisation du confort thermique

Différentes définitions sont données pour le confort thermique selon que l'être humain est considéré comme un objet physique, une machine thermique auto-régulée, ou une personne active affectée par ses sensations. Selon [Givoni \(1981\)](#), ce sont les conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale. Pour [Buratti and Ricciardi \(2009\)](#), le confort est un état d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique. En effet, les parties profondes du corps humain sont maintenues à une température fixe (homéothermie). Le maintien de la température interne du corps humain autour de 37 °C ([ASHRAE, 2009](#)) nécessite un équilibre thermique avec son environnement. Les parties superficielles, en particulier la peau ont une température qui peut varier entre certaines limites en fonction des échanges avec l'environnement.

La chaleur métabolique produite dans le corps peut être stockée dans celui-ci,

induisant une élévation de la température interne, ou dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire sous forme de chaleur sensible et latente. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange de chaleur sensible à la surface cutanée, la chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible) et par évaporation (chaleur latente). Selon [Ashrae \(2009,\)](#), le bilan thermique du corps s'écrit de la façon suivante.

$$S = M - W_k - E_{sk} - E_r - C - R - C_k[w/m^2] \quad (1.3)$$

Avec M : chaleur métabolique, W_k : travail externe, E_{sk} : flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau, E_r : flux de chaleur échangé par voie respiratoire, C : flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface de la peau, R : flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface de la peau, C_k : flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface de la peau.

La production de l'énergie métabolique, notée M , est le reflet de la vie cellulaire qui résulte de la consommation d'oxygène et du dégagement du gaz carbonique. Une partie du métabolisme est utilisée par les muscles pour le travail externe, noté W , qui est défini en fonction du métabolisme par un facteur n , appelé rendement mécanique ($W = n.M$); n n'excède pas 20% et pour les activités classiques de bureau il est pratiquement nul. Dans la pratique, il est estimé à partir des tableaux qui donnent le métabolisme en fonction de la description de l'activité ou la tâche. La puissance métabolique est donnée par rapport à la surface corporelle. Elle est exprimée souvent en Met, l'unité de Met est égale à $58.15W/m^2$ et correspond au métabolisme d'un individu assis au repos.

Ces différents échanges définissent la perception de l'environnement par l'individu. Cette appréciation est différente selon la société et pour une même société suivant les individus. Au niveau international des standards de confort dans le bâtiment ont été établis. On distingue deux grandes procédures pour l'évaluation du confort dans les enceintes climatiques donc analytique et celle empirique évaluée par des sondages de terrain ([A.Tablada, la Peña, and Troyer, 2005](#)). A ceux-ci on peut ajouter les diagrammes bioclimatiques qui sont des outils de conception.

1.2.4.1 Les standards et normes de confort thermique

1.2.4.1.1 L'approche analytique

L'approche analytique traite le confort thermique à travers le calcul du bilan thermique du corps humain. Les résultats de recherches publiés jusqu'à ce jour, notamment ceux de [Gagge, Stolwijk, and Hardy \(1967\)](#); [Gagge \(1981\)](#) aux États unis et de [Fanger et al. \(1985\)](#) au Danemark permettent d'opérer une sélection

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

des principaux paramètres à prendre en compte. Les paramètres qui influencent le confort sont essentiellement la vitesse et l'hygrométrie de l'air, la température sèche et la température moyenne radiante. Les travaux de Fanger et al. (1985) sur les ambiances thermiques ont abouti à la mise en place de la norme ISO 7730 (Nicol, 2004; Nicol and Humphreys, 2002).

La méthode de Fanger consiste à déterminer de façon analytique les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement. Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée (bilan thermique) par le corps humain vêtu, supposé être aux valeurs de confort du débit sudoral et de température cutanée. L'indice "PMV" établi, prévoit le vote moyen de sensation thermique (globale) d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE². Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, il a lié le PMV à un autre indice, le "PPD", qui prévoit le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée. La relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5% pour un vote égal à zéro (sensation neutre), puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre du vote zéro vers les sensations chaude et froide.

$$PMV = [0,303.exp(-0,036.M) + 0,028].S \quad (1.4)$$

$$PPD = 100 - 95.exp[-(0,03353.PMV^4 + 0,2179.PMV^2)] \quad (1.5)$$

L = l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue, PMV = vote moyen prévisible sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE PPD = pourcentage prévu des insatisfaits,

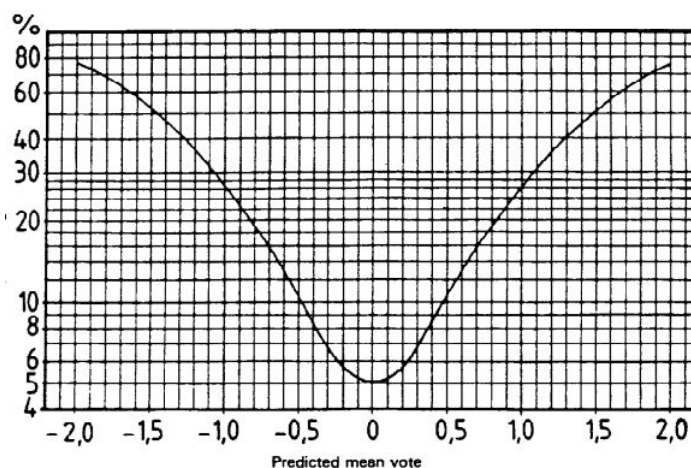


FIGURE 1.11 – PPD en fonction de PMV

2. ASHRAE :American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

A ce modèle analytique on peut citer d'autres modèles comme le modèle à deux nœuds de Gagge qui introduit les paramètres :ET(new effective température) et SET(température effective standard) et PMV(PMV calculé à partir du ET). Le ET permet de calculer la mouillure et le flux de chaleur cutané. Le SET représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet, portant une vêtue standardisée par rapport à son activité, échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. De plus, Gagge propose de remplacer la température opérative par la température effective dans le calcul du PMV. Le PMV ainsi calculé est noté PMV*, permet de mieux prendre en compte les effets de l'humidité en zone chaude.

Les approches analytiques sont développées en chambre climatique. Dans les situations réelles, les conditions de confort rencontrées varient avec le contexte des études. Dans une étude réalisée sur différents types de bâtiments (climatisés et non climatisés) situés dans trois villes australiennes avec différent climat, de Dear (de Dear and Brager, 1998; Cena and de Dear, 2001; de Dear, 1998) a constaté l'incapacité du PMV à prédire les conditions de neutralité thermique dans les deux types de bâtiment, alors que les équations de régression linéaire déterminées par des enquêtes antérieures permettent de mieux prédire la neutralité thermique.

Dans les bâtiments non climatisés où les conditions thermiques varient avec les fluctuations de l'environnement extérieur, l'intervalle de confort est plus large que celui prévu par le PMV ou le SET qui ont une tendance à surestimer les sensations de chaleur en période estivale dans ce type de bâtiment surtout dans les climats chauds.

Ces indices, pourtant supposés universels, montrent une incapacité de prédire les conditions de confort rencontrées dans les études in situ. Ils sont adéquats pour les bâtiments ayant des ambiances intérieures contrôlées, mais manquent de fiabilité dans les bâtiments en évolution libre avec une tendance à surestimer le niveau d'inconfort. La généralisation de l'utilisation des indices du confort analytique dans le climat tropical implique un recours systématique à la climatisation des ambiances et induit des dépenses énergétiques exorbitantes.

1.2.4.1.2 Approche adaptative

Une autre approche considère le confort thermique à travers les réactions comportementales qui caractérisent la capacité adaptative de l'occupant dans son environnement. Cette approche est basée sur des sondages de terrain, et utilise les résultats des études expérimentales in situ pour définir les conditions de confort en fonction des données météorologiques extérieures. Cette approche suscite actuellement beaucoup d'intérêts, des réflexions ont été menées afin de l'inclure dans les normes actuelles qui ne sont, pour l'instant, que basées sur les méthodes de

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

l'approche analytique.

La méthode adaptative développée dans ([standard ASHRAE55, 2004](#)) permet de calculer la température de confort T_c dans les bâtiments soumis à une ventilation naturelle en fonction de la moyenne mensuelle de la température extérieure T_o .

$$T_c = 0.31T_o + 17.8 \quad (1.6)$$

Avec, T_c : la température de confort ;

T_o : la moyenne mensuelle de la température extérieure.

Cette température de confort est la température opérative dans le bâtiment qui prend en compte le rayonnement des parois ainsi que la vitesse de l'air. Le [standard ASHRAE55 \(2004\)](#) définit une bande de $\pm 2,5^\circ\text{C}$ de largeur autour la température de confort pour 90% d'acceptabilité, et de $\pm 3,5^\circ\text{C}$ de largeur pour 80% d'acceptabilité.

En Europe, le projet SCATs (smart control and thermal confort) a permis de déterminer des paramètres du confort adaptatif caractérisant différentes régions en Europe. Ce projet a été à l'origine de la norme EN15251 ([EN15251, 2007](#)) qui introduit une température flottante permettant de prendre en compte avec plus de précision l'impact de la température extérieure sur le bâtiment. Les méthodes traitant du confort adaptatif ne définissent pas en générale de limites quand il s'agit de l'humidité de l'air [EN15251 \(2007\)](#); [standard ASHRAE55 \(2004\)](#) et se limite à la température opérative.

Le standard de confort adaptatif de l'ASHRAE recommande d'utiliser cette méthode uniquement pour les bâtiments ventilés naturellement donc en évolution libre. Cependant quelques réserves sont émises quant à la possibilité de l'extrapoler à toutes sortes de conditions, puisque les méthodes utilisées reposent sur des analyses statistiques et des mesures réalisées dans un certain nombre de bâtiments.

Sur la Figure 1.12, on peut observer un manque de travaux dans le climat tropical africain concernant le confort adaptatif. Compte tenu du contexte économique et énergétique de ces pays les bâtiments sont très souvent en évolution libre, ce qui rend l'application systématique des méthodes Analytiques inadéquates. Cependant, le confort adaptatif présente des limites, car il revêt un volet culturel et climatique.

1.2.4.2 Les diagrammes bioclimatiques

Les diagrammes bioclimatiques sont des outils de synthèse qui permettent de choisir les grandes options architecturales à partir des exigences du confort thermique et des profils du climat. Le principe consiste à confronter sur un même graphique, « un polygone de confort », représentant les conditions extérieures et l'aire d'influence thermique et hygrométrique de certaines solutions architecturales ou de certains dispositifs. Parmi les outils les plus connus dans ce domaine on peut citer le diagramme bioclimatique d'Olgyay ([Olgyay, 1963](#)), celui de Givoni ([Givoni,](#)

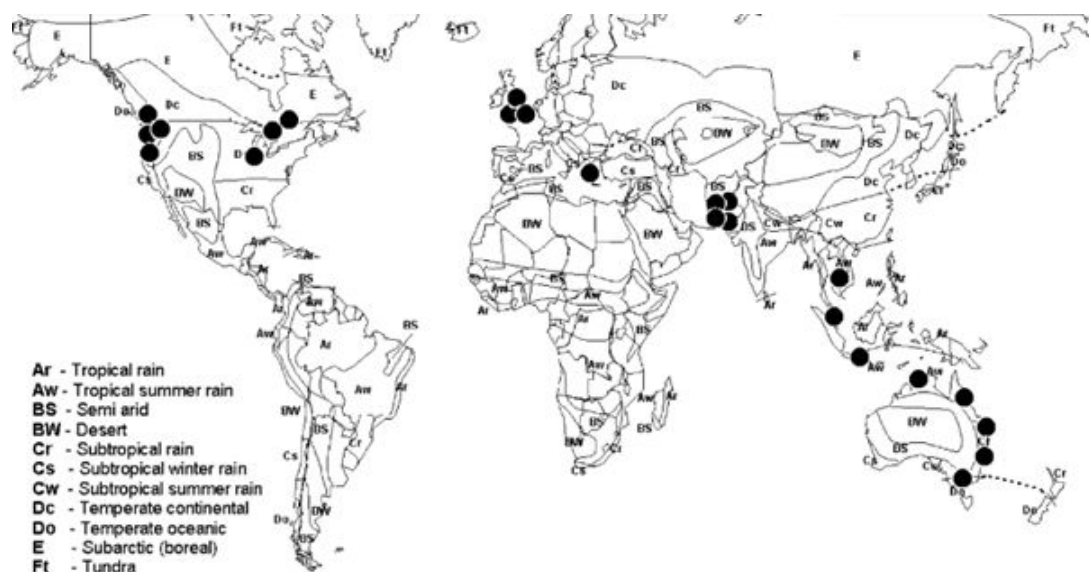


FIGURE 1.12 – Carte illustrant les travaux sur le confort adaptatif dans le monde

1992), les tables de Mahoney, et la méthode de Szokolay. Dans la section suivante, nous allons nous attarder sur les diagrammes de de Givoni et d'Olgyay.

1.2.4.2.1 Le diagramme d'Olgyay

Cette méthode est basée sur un diagramme bioclimatique mettant en évidence la zone du confort humain en relation avec la température d'extérieur, l'humidité, la température radiante moyenne, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et la perte de chaleur par évaporation. La méthode assume que le confort thermique ne peut être estimé à partir du seul paramètre qu'est la température d'air, mais fait intervenir plusieurs facteurs tels que l'humidité et la vitesse d'air.

Il s'agit d'une procédure systématique pour l'adaptation de la conception des bâtiments aux exigences humaines et aux conditions climatiques. Cependant, le système est limité dans ses applications. Du fait que les analyses des exigences physiologiques sont basées sur le climat extérieur et non sur celui qui est attendu à l'intérieur du bâtiment. C'est une méthode destinée aux bâtiments dont l'évolution de température intérieure est fortement corrélée à la température extérieure. La méthode est adaptée pour une application dans les régions humides où il y a une légère différence entre les conditions intérieures et celles de l'extérieur (Givoni, 1992).

1.2.4.2.2 Le diagramme de GIVONI

Givoni se base sur les études concernant le métabolisme et des diverses voies d'échanges thermiques entre le corps et l'environnement pour la charte bioclimatique

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

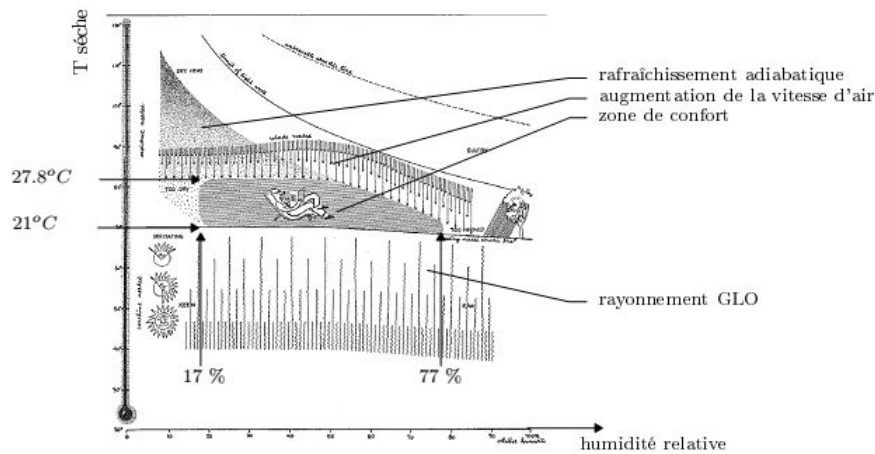


FIGURE 1.13 – Diagramme bioclimatique **Olgay** (1963)

qui représente les limites des ambiances confortables en deux parties :

- le confort proprement dit ;
- entouré d'une zone de « conditions supportables ».

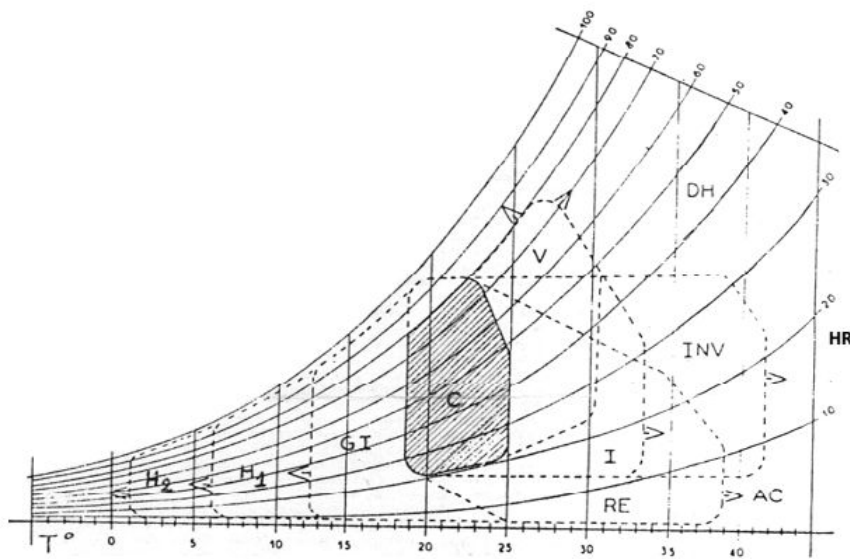


FIGURE 1.14 – Diagramme de Givoni

La méthode décrite fait appel à l'indice de contrainte thermique pour évaluer les exigences physiologiques du confort, à partir desquelles on détermine les grandes lignes de la conception du bâtiment ; elle comprend aussi une estimation du climat intérieur attendu sous les conditions ambiantes (**Givoni, 1992**).

Différentes solutions peuvent être envisagées à partir de l'interprétation du diagramme de GIVONI, pour créer une ambiance adaptée aux caractéristiques climatiques locales et à la destination des locaux. Le diagramme de GIVONI (Milne and Givoni, 1979) permet de situer les actions possibles pour créer une situation favorable au confort. Ces actions sont de trois types :

- une action liée à la conception des composants du bâtiment, par exemple utilisation de l'inertie en climat chaud et sec ;
- Une action liée à la gestion des parties du bâtiment pour moduler la ventilation des locaux ;
- Une action liée au choix de la technique de climatisation.

Ce diagramme de GIVONI permet de déterminer pour un climat donné, le domaine d'efficacité des méthodes de conception et des méthodes de climatisation passive ou active. Givoni (1992) propose une zone dédiée aux climats chauds qu'il intègre sous le nom des pays en voie de développement. En climat chaud, une augmentation de la vitesse permet de déplacer le seuil supérieur de 4 °C atteignant ainsi 33°C. Quel que soit la zone, la limite basse de température est indépendante de l'humidité tandis que la limite haute présente une forte dépendance dès lors que l'humidité relative devient supérieure à 90 % (Givoni, 1992).

1.2.5 La conception bioclimatique

Malgré la faible consommation d'énergie en général et d'électricité en particulier des pays d'Afrique, il y a un potentiel significatif pour les économies d'énergie et la démarche durable d'une manière générale dans le secteur du bâtiment³. Les coûts des nouveaux matériaux et la forte croissance démographique entraînent des constructions informelles avec des matériaux précaires et on assiste à une crise du logement. Face à cette crise de logement, le plus urgent est de fournir des logements aux millions de foyers. Très souvent les règles de constructions durables et d'efficacité énergétique sont ignorées ou tout simplement n'existent pas. Sur la Figure 1.15, on relève qu'un grand nombre de pays d'Afrique sub-saharienne dont le Burkina Faso ne dispose pas de spécifications et réglementation thermique.

En effet, les populations les plus pauvres doivent s'adapter au stress thermique et se contenter des équipements les moins performants. Les environnements intérieurs sont inconfortables et cela pèse sur la santé et la productivité. Du fait du contexte climatique africain, les occupants des bâtiments auront de plus en plus besoin de ressources énergétiques pour l'atteinte des consignes de confort thermique, source potentielle d'importante consommation d'énergie. Les bâtiments modernes dans ces pays, sont inadaptés à la chaleur car en absence de réglementation sur le volet énergétique (Janda and Busch, 1994; Iwaro and Mwasha, 2010), la conception est

3. ONU habitat (<http://unhabitat.org/urban-themes-2/>)

1.2. Les interactions entre le bâtiment et son environnement

basée sur des technologies et standards provenant d'autres contextes sociologiques et climatiques. Il est primordiale de nos jours de chercher à adapter le secteur du bâtiment au contexte climatique dans les régions de l'Afrique sub-saharienne notamment sur le volet énergie et bâtiment. Accroître l'efficacité de l'utilisation de l'énergie et promouvoir l'utilisation de solutions durables doit être une priorité dans les mesures prises pour protéger l'environnement.

L'architecture vernaculaire de ces régions présente des informations bioclimatiques intéressantes mais, compte tenu des changements socio-culturels, les populations ont de nouveaux besoins. L'adaptation de l'habitat au climat environnant est le concept d'architecture bioclimatique. Ce mode de conception découle d'une connaissance exhaustive de l'environnement. Il doit faire le lien entre le bâtiment (site, forme, matériaux, mise en oeuvre...), le bien-être (confort thermique et visuel) de son occupant et le respect de l'environnement.

		Mexico		
Ethiopia	Costal Rica	Slovak Rep.	Indonesia	
Gabon	Cameroun	Romania	South Africa	Bahamas
Ghana	Burundi	South Korea	Thailand	Equatorial Guin.
Grenada	Burkina Faso	Slovenia	Malaysia	Antigua and Barbuda
Guinea	Nigeria	Czech Rep.	Egypt	Omar
Guyana	Barbados	Finland	Saudi Arabia	Qatar
Kenya	Togo	Portugal	Taiwan	Paraguay
Mali	Liberia	Singapore	Sri Lanka	Algeria
Tanzania	Ecuador	Tunisia	Palestine	Morocco
Dominica	Cuba	Bahrain	Pakistan	Colombia
Angola	Bangladesh	Turkey	Lebanon	Brazil
Trinidad and Tobago	St Vincent		Syria	
	Zambia		Belgium	
No Standard		Mandatory	Mixed	Proposed

FIGURE 1.15 – Les standards d’énergie dans le bâtiment et pays en développement repris de [Iwaro and Mwasha \(2010\)](#)

Elle tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la ventilation naturelle pour réduire les besoins énergétiques, maintenir des températures agréables, contrôler l'humidité et favoriser l'éclairage naturel. Elle repose sur trois notions de base : le chauffage passif, le refroidissement passif et l'éclairage naturel. Évidemment nous

nous focaliserons sur la stratégie de froid compte tenu des climats qui prévalent généralement en Afrique sub-saharienne et particulièrement au Burkina Faso.

1.3 Le refroidissement passif de l'habitat

Dans le contexte climatique tropical et subtropical la conception bioclimatique se résumera aux techniques de refroidissement passif et d'éclairage naturel. Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement. Le refroidissement passif couvre tous les processus naturels et les techniques de refroidissement ne nécessitant aucune forme d'apport énergétique, autre que les sources d'énergie renouvelables. La Figure 1.16 présente la classification des stratégies passives pour le bâtiment proposée par Geetha and Velraj (2012).

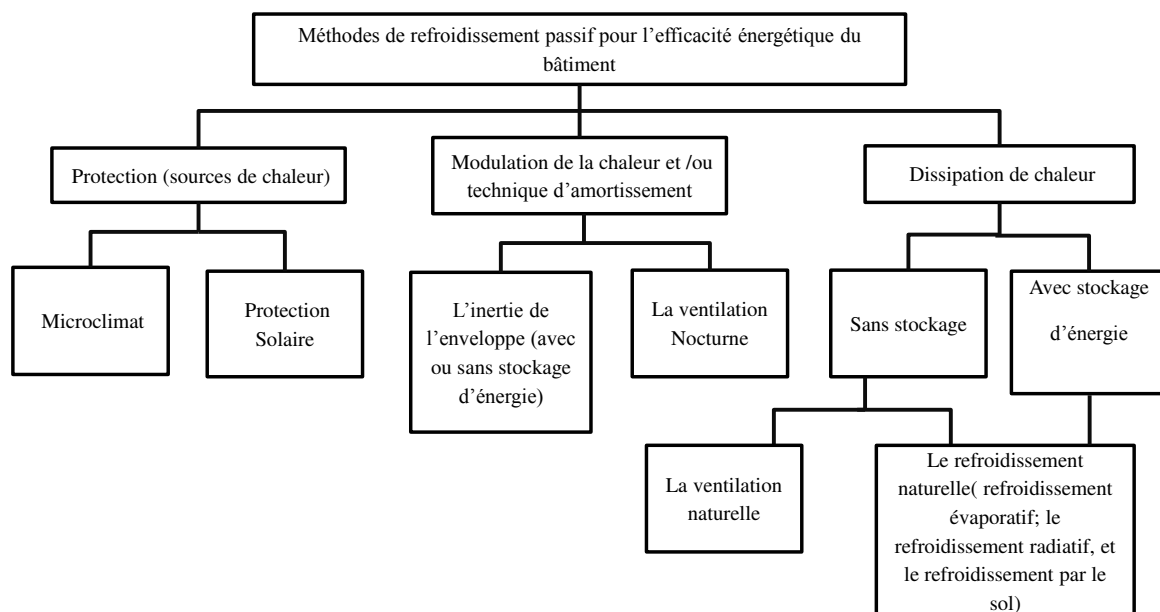


FIGURE 1.16 – Classification des méthodes de refroidissement passif dans les bâtiments économes en énergie

1.3.1 Techniques de protections solaires

Les surfaces du bâtiment exposées au soleil comme les fenêtres, les murs et les toits peuvent conduire aux surchauffes des ambiances intérieures. Les traces laissées

1.3. Le refroidissement passif de l'habitat

par nos prédécesseurs montrent que la prise en compte du soleil dans l'architecture est un thème très ancien (Izard, 2014), que l'habitat moderne ne prend pas en compte systématiquement. A quelques exceptions près, dans nos régions une analyse de l'enveloppe n'est pas appliquée au stade précoce de la conception, lorsque des décisions avec peu d'impact économique pourraient conduire à des économies d'énergie importantes au cours de la durée de vie du bâtiment, et une amélioration simultanée de conditions intérieures. Ainsi dans les pays à climats chauds d'Afrique sub-saharienne, l'architecture bioclimatique et les systèmes de refroidissement passif sont faiblement explorés. Protéger le bâtiment, et particulièrement ses ouvertures, de l'ensoleillement direct afin de limiter les gains directs revient à ériger des écrans, extérieurs si possible, qui le mette à l'ombre.

Malgré, une température ambiante supportable, le rayonnement chaud du vitrage et le rayonnement direct du soleil sur une partie du corps peuvent devenir rapidement inconfortable. L'ensoleillement est caractérisé par la trajectoire du soleil et la durée d'exposition. La trajectoire du soleil décrit sa position. Cette position change selon les saisons et en fonction du point à partir duquel il est vu. La Figure 1.17 est une projection stéréographique du parcours du soleil sous la latitude de Ouagadougou et montre que toutes les façades sont susceptibles d'être ensoleillées au cours de l'année.

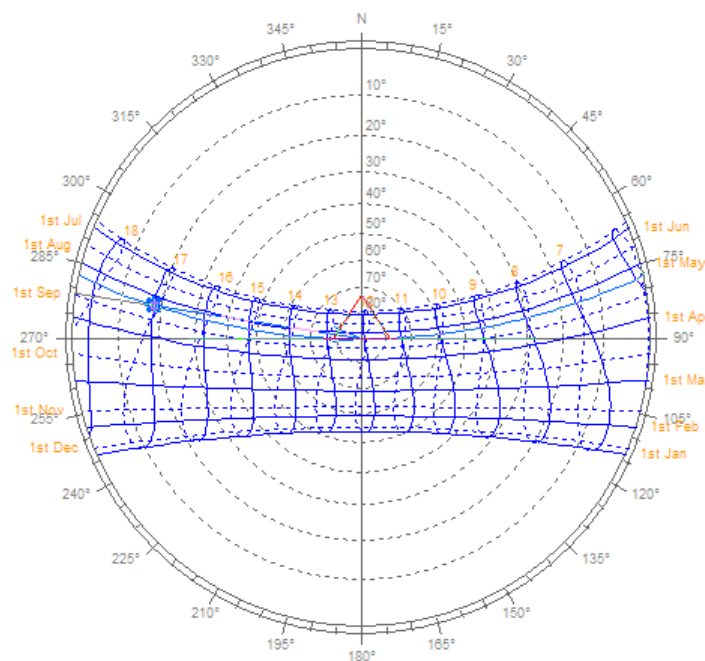


FIGURE 1.17 – Projection stéréographique du parcours du soleil pour le cas de Ouagadougou

Les protections solaires des fenêtres peuvent être des dispositifs situés à l'extérieur du bâtiment (les auvents, les persiennes, le flanc, la loggia, la végétation, et les débords de toiture) ou intérieure comme les rideaux, les stores etc. Parmi les différentes solutions de protection, intercepter les rayons du soleil avant qu'ils ne touchent les baies vitrées est une solution efficace (Kim et al., 2012; Gratia and Herde, 2007).

Les fenêtres entièrement ombragées de l'extérieur peuvent réduire les apports solaires de l'ordre de 80% (ASHRAE, 2009b). Selon Dubois (1997), les protections solaires peuvent contribuer à une réduction de l'ordre de 23 – 89% de l'énergie nécessaire pour le refroidissement du bâtiment. Ce taux de réduction dépend du type de protection, de l'orientation du bâtiment, de l'isolation, du climat etc. Les dispositifs de protections peuvent être aussi opérables ou fixes. Les dispositifs fixes présentent l'inconvénient d'être moins efficaces durant la période hivernale dans les régions froides où le soleil peut être exploité à des fins de chauffage passif. Dans les régions tropicales et subtropicales, compte tenu de l'intensité de l'ensoleillement, l'objectif principal de la conception des fenêtres est d'améliorer le confort thermique d'été (Freewan, Shao, and Riffat, 2008; Edmonds and Greenup, 2002).

Une attention particulière doit être accordée aux impacts sur l'éclairage naturel. Ochoa and Capeluto (2006), relève que dans les climats chauds où l'éclairement est élevé tout au long de l'année, l'éclairage naturel n'est pas suffisamment exploité en comparaison aux climats tempérés.

En effet, l'environnement visuel procure une sensation de confort lorsqu'il est possible de voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable. Les principaux paramètres du confort visuel dont il faut tenir compte sont les suivants : le niveau d'éclairement des surfaces de travail, l'absence d'éblouissement, un rendu des couleurs compatible avec les tâches à accomplir, une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace etc. Les normes d'éclairage artificiel comme ISO (2002) déterminent des valeurs seuils pour les différents paramètres sus-cités en fonction de l'utilisation du bâtiment. Du fait que la lumière naturelle a des qualités que l'éclairage artificiel ne peut reproduire, Dubois (2003) discute des problèmes inhérents à l'utilisation des normes spécifiques à l'éclairage artificiel ISO (2002) pour effectuer des recherches sur les impacts des protections solaires sur l'éclairage naturel d'un espace donné. Basé sur la recherche de Nabil and Mardaljevic (2005, 2006), le "Useful Daylight Index (UDI)" propose un nouveau paradigme pour évaluer la lumière du jour dans les bâtiments. Ils définissent une plage d'éclairement de lumière du jour utile 100-2000Lux. Les valeurs d'éclairement supérieures à 2000 lux sont considérées comme étant à l'origine d'éblouissement et celles inférieures à 100 lux sont jugées faibles. L'UDI détermine le rapport de temps exact annuel pour lequel l'éclairement est inférieur à 100 lux et supérieur à 2000 lux. Il est obtenu par le rapport du nombre d'heures total où l'éclairement en tout point d'une pièce se situe dans la plage définie. Ainsi, plus l'environnement intérieur du bâtiment a un grand

1.3. Le refroidissement passif de l'habitat

UDI, plus il offre un éclairage adéquat pour les différentes tâches de l'occupant. Nous adopteront l'UDI par la suite pour évaluer l'impact des protections solaire et les ouvertures sur l'éclairage naturel lors des études sur leur comportement.

1.3.2 Les techniques de dissipation de la chaleur et la ventilation naturelle

1.3.2.1 La ventilation naturelle

La ventilation naturelle est une technique importante de refroidissement passif. En général, la ventilation des environnements intérieurs est également nécessaire pour maintenir les niveaux requis de qualité de l'air dans un espace. Dans le bâtiment, elle impacte sur deux facteurs :

- La température de l'air intérieur, puisqu'il y a un apport de l'air extérieur à la température dans une enceinte où l'air est à la température donnée.
- La température de surface des parois car la convection va entraîner un échauffement ou un refroidissement de ces dernières.

Dans les environnements chauds, la dissipation des surchauffes peut être réalisée grâce à la ventilation naturelle, en exploitant les gradients de température. Son efficacité dépend de la température de l'air extérieur. Selon [Geetha and Velraj \(2012\)](#) la ventilation nocturne peut permettre de réduire la consommation d'énergie pour le refroidissement de près de 20%. Dans les régions où le rayonnement solaire est élevé, la ventilation de structures de bâtiment permet de réduire l'énergie nécessaire pour le refroidissement pendant la période de surchauffe ([Ciampi, Leccese, and Tuoni, 2003](#); [Dimoudi, Androutsopoulos, and Lykoudis, 2006](#); [Gagliano et al., 2012](#); [Hadavand, Yaghoubi, and Emdad, 2008](#)).

[Givoni \(1991\)](#) différencie la ventilation pour le confort de la ventilation pour le refroidissement (ventilation nocturne par exemple). La ventilation de confort ne permet pas d'atteindre une température de consigne, mais améliore le confort physiologique de l'occupant, en créant un flux d'air. Pour plus d'efficacité il préconise la ventilation traversante et des structures légères. La ventilation nocturne peut être une méthode d'amortissement de la chaleur. Le bâtiment est refroidi pendant la nuit par la ventilation, et cette fraîcheur stockée permet de supporter les surchauffes durant les heures de rayonnement solaire. En outre, il faut des structures lourdes pour un bon stockage et une bonne isolation thermique. Le bâtiment ne doit pas être ouvert pendant la journée. En termes de température, il est nécessaire que l'amplitude thermique (au moins 10°C) soit la plus grande possible pour un meilleur rendement ([Givoni, 1992](#)).

[Ghiaus and Allard \(2006\)](#) évaluent le potentiel de refroidissement de la ventilation naturelle à l'aide d'une méthode basée sur la différence de température intérieure et extérieure du bâtiment en évolution libre et les critères de confort

d'adaptatif. Il démontre que la température d'évolution libre "free running", peut être utilisée à la place des bilans de températures dans les méthodes d'estimation de l'énergie. La température d'évolution libre "free running" est définie comme la température lorsqu'aucun équipement énergétique n'est utilisé (Ghiaus and Allard, 2006; Ghiaus, 2003). La Figure 1.18 montre les zones de pertinence des stratégies de chauffage et de refroidissement en fonction du confort adaptatif et des températures intérieures et extérieures. Cette méthode est intéressante car elle se base sur les températures du bâtiment. La méthode s'apparente à la méthode des degrés-heures mais avec une base dynamique. Les degrés-heures sont obtenus par les formules suivantes Ghiaus (2006) :

$$\delta_R = \begin{cases} 1, & \text{quand } T_{fr} > T_{ch} \text{ et } T_o > T_{ch} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.7)$$

$$D_R = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{ch}(i, j)] \delta_R \quad (1.8)$$

$$\delta_v = \begin{cases} 1, & \text{quand } T_{fr} > T_{ch} \text{ et } T_o < T_{ch} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.9)$$

$$D_v = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{ch}(i, j)] \delta_v \quad (1.10)$$

$$\delta_c = \begin{cases} 1, & \text{quand } T_{fr} < T_{cb} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (1.11)$$

$$D_c = \sum_j \sum_i [T_{fr}(i, j) - T_{cb}(i, j)] \delta_c \quad (1.12)$$

Avec D_V , les degrés-heures de la ventilation pour le refroidissement ; D_R , les degrés heures de refroidissement par climatisation ; D_H , les degrés heures de chauffage ; T_{ch} , la limite supérieure du confort ; T_{cb} , la limite inférieure du confort ; T_o , la température de l'air extérieur ; T_{fr} , la température d'évolution libre ; i , indice relatif aux heures ; j , indice relatif aux jours (1 à 365).

Elle diffère du concept de Givoni qui se base sur les données climatiques et peut être utilisée pour caractériser la sévérité du climat pour une configuration de bâtiment donnée. Dans la suite cette méthode sera adoptée dans le cadre de cette thèse.

1.3.2.2 Le refroidissement Radiatif

Le refroidissement radiatif est basé sur la perte de chaleur par émission de rayonnement infrarouge d'un corps à un autre corps de température plus basse, qui joue le rôle de dissipateur de chaleur. Dans le cas des bâtiments, le corps refroidi est le

1.3. Le refroidissement passif de l'habitat

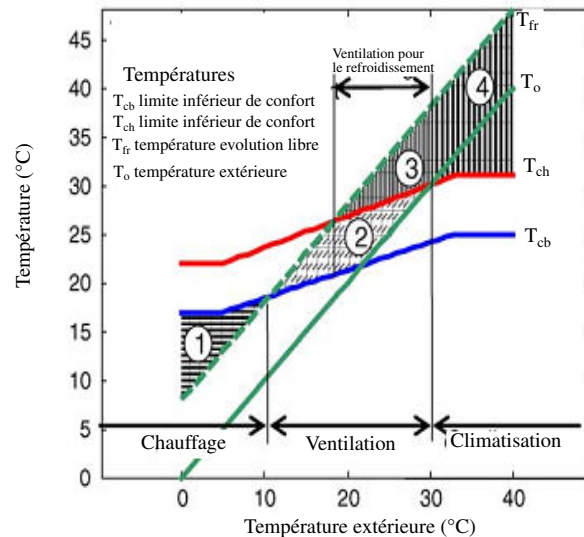


FIGURE 1.18 – Zones de pertinence des CVC repris de Ghiaus (2006)

bâtiment et le dissipateur de chaleur est le ciel, puisque la température de ciel est inférieure aux températures de la plupart des objets sur la terre. C'est le mécanisme qui permet à la terre de dissiper la chaleur reçue du soleil afin de maintenir son équilibre thermique. Il existe deux méthodes d'application de refroidissement radiatif dans les bâtiments : directs ou le refroidissement radiatif passif, et le refroidissement radiatif hybride. Dans le premier, l'enveloppe du bâtiment rayonne vers le ciel et se refroidit ce qui induit une perte de chaleur dans le bâtiment (Cole, 1976). Dans le second cas, le radiateur n'est pas l'enveloppe du bâtiment, mais habituellement une plaque métallique.

Une technique de refroidissement radiatif passif simple consiste à doter le toit d'une surface ayant un albédo élevé. La surface réfléchissante n'affecte pas significativement le taux de radiation dans la nuit, car celle-ci a la même émissivité que le toit de surface conventionnelle. L'avantage d'un toit plus réfléchissant, est qu'il absorbe moins de rayonnement solaire pendant le jour, et peut donc être facilement refroidi par radiation thermique pendant la nuit (Parker and Jr., 1997; Prado and Ferreira, 2005; Synnefa, Santamouris, and Akbari, 2007).

Muselli (2010) a présenté un matériau de revêtement de faible coût permettant de limiter les gains de chaleur au cours du cycle diurne pour les saisons chaudes. Il a étudié son comportement et comparé avec d'autres matériaux de toiture classiques disponibles. Les résultats de simulation ont montré que les toits réfléchissants permettent de réduire la consommation d'énergie de refroidissement de 26-49%, par

rapport aux autres matériaux. Les techniques de refroidissement radiatif comme solutions passives dans notre contexte climatique seront évaluées par la suite dans ce document.

1.4 Conclusion

Un regard sur l'architecture vernaculaire qui utilisait des techniques immuables et en étroites relations avec le climat du fait de la faiblesse technologique a mis en évidence les incohérences dans la conception des bâtiments contemporains. Le résultat est un habitat mal adapté à son contexte climatique. Ce constat est accentué dans les régions où sévit le climat tropical et offre un grand potentiel pour la démarche bioclimatique et la construction durable notamment sur le plan énergétique. De nos jours la conception bioclimatique et l'utilisation de techniques passives sont des solutions faiblement explorées. La solution passe par la connaissance du comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment et l'utilisation de solutions de refroidissement passif adaptées. Dans le cadre de notre contribution à cette problématique, une étude sur le comportement thermique de l'enveloppe est initiée grâce à la simulation. Les approches et les différents outils de simulation feront l'objet du chapitre suivant.

Une approche innovante de la simulation des performances énergétiques du bâtiment

Sommaire

2.1	Introduction	39
2.2	La simulation des performances énergétiques du bâtiment	40
2.2.1	Modélisation et simulation du bâtiment	40
2.2.2	Évolution des outils simulation énergétique du bâtiment	42
2.2.3	La simulation : outil d'aide à la conception	43
2.2.4	La simulation : étude du comportement des bâtiments existants	44
2.2.5	Freins à l'utilisation de la simulation dans le bâtiment	44
2.3	Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment	46
2.3.1	Les enjeux de l'interopérabilité	46
2.3.2	Les outils les plus utilisés au niveau international	52
2.3.3	Les besoins d'optimisation	55
2.4	Conclusion	58

2.1 Introduction

La modélisation et la simulation occupent une place très importante dans la recherche scientifique et le développement industriel. Les outils de simulation de la performance thermique du bâtiment "BPS¹" peuvent servir de support pour le développement et la mise en place de bâtiments à haute efficacité énergétique. La simulation a pour but d'imiter les conditions physiques réelles en utilisant des modèles mathématiques pouvant représenter tous les flux d'énergie ainsi que leurs interactions. Ces outils deviennent de plus en plus indispensables pour les acteurs

1. Building Performance Simulation tools

Chapitre 2. Une approche innovante de la simulation des performances énergétiques du bâtiment

du domaine de la conception et de l'exploitation des bâtiments (Wetter, 2011a; Sahlin et al., 2004; MacQueen, 1997; Clarke et al., 2004; Augenbroe et al., 2004). Pour les pays en développement, l'utilisation de ces outils peut permettre de mener des réflexions intéressantes sur les interactions entre climat et bâtiment dans le but de maîtriser les besoins énergétiques et améliorer le bien-être dans les environnements intérieurs. Dans ce chapitre, nous revenons sur l'évolution et les intérêts de la simulation, tout en justifiant le choix des outils qui seront utilisés par la suite dans le document.

2.2 La simulation des performances énergétiques du bâtiment

2.2.1 Modélisation et simulation du bâtiment

Toute simulation de modèle est basée sur des équations, des principes et des hypothèses. Les résultats peuvent être incorrectes, si certaines hypothèses ne sont pas prises en compte dans la simulation ou ne cadrent pas avec la réalité. Il existe de nombreuses méthodes de modélisation du bâtiment. Différents critères peuvent être utilisés pour classer les modèles de simulation des performances thermiques du bâtiment.

Selon Reddy and Maor (2006), les modèles informatiques en général peuvent être de type diagnostic ou pronostic, ou encore définis comme modèles de connaissance ou inverse. Les modèles diagnostics sont utilisés pour connaître la nature et la cause d'un phénomène alors que les modèles pronostics étudient un système au moyen des lois décrivant le comportement. Les modèles inverses, quant à eux évaluent le comportement du système pour prédire ses propriétés tandis que les modèles de connaissance prédisent le comportement grâce à une description des propriétés et des conditions d'utilisation du système.

Les modèles de simulation énergétiques du bâtiment utilisés dans la phase conception sont en général des modèles pronostics et de connaissance. Ils sont plus flexibles à l'image des modèles physiques réels et sont plus adaptés aux études comparatives. Dans le bâtiment, l'approche de modélisation inverse peut trouver son application dans le cas où la simulation a pour but de comprendre le comportement thermique d'un bâtiment existant. Cela nécessite que le modèle soit en mesure de représenter fidèlement le comportement réel du bâtiment. La modélisation inverse dans la simulation énergétique du bâtiment peut être classée en trois approches (Reddy and Klaus, 2002) qui sont les boîtes blanches, les boîtes grises et les processus qui consistent à calibrer les modèles de connaissance. Les modèles boîtes noires et grises permettent de modéliser un système à partir des données d'entrée et de sortie, à l'aide de fonctions mathématiques génériques (qui peuvent avoir un sens physique

2.2. La simulation des performances énergétiques du bâtiment

"boîte grise" ou pas "boîte noire"), choisies pour leur capacité à représenter le phénomène que l'on veut modéliser. Enfin, la calibration de modèles de connaissance permet d'avoir un bon compromis entre mesures et simulations en ajustant (tout en tenant compte des incertitudes) les paramètres d'entrée. Les limites de cette dernière approche sont le nombre élevé des paramètres, les efforts en termes de temps de mise en œuvre et l'expertise de l'utilisateur. Enfin les modèles de simulation énergétique du bâtiment peuvent être statiques ou dynamiques. Les modèles statiques ne permettent pas de prendre en compte l'inertie de l'enveloppe dans le calcul des bilans de chaleur à l'inverse des modèles dynamiques.

La Figure 2.1, donne une illustration des données d'entrée d'un modèle de BPS qui se composent essentiellement de la géométrie du bâtiment, des apports internes (occupants, récepteurs électriques), des données météorologiques, des stratégies d'exploitation, des systèmes CVC² et des paramètres spécifiques de simulation (critères de convergences, pas de temps, simulation ou dimensionnement).

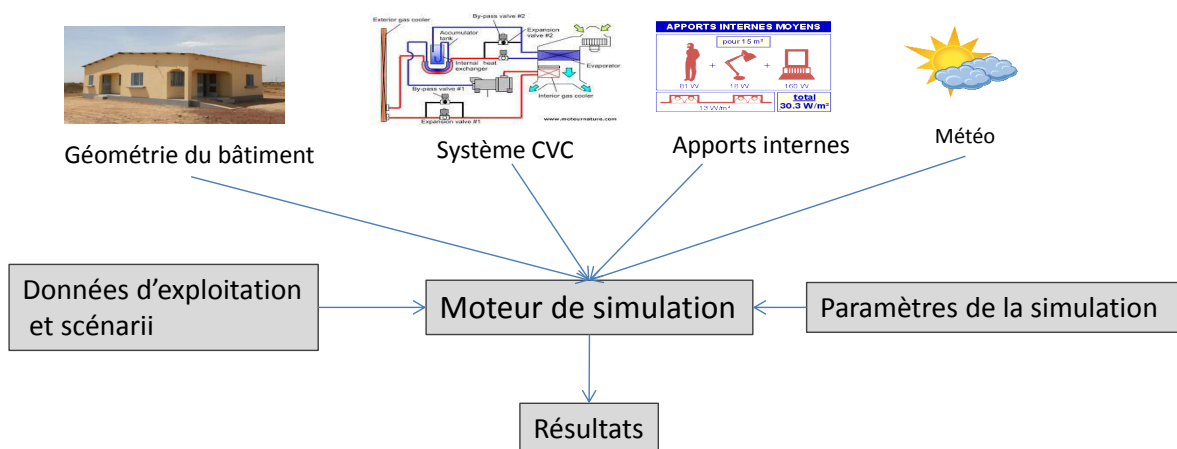


FIGURE 2.1 – Illustration des données d'entrée pour les outils de simulation

2.2.2 Évolution des outils simulation énergétique du bâtiment

L'évolution des outils de simulation dans le domaine du bâtiment est liée à la volonté de pouvoir représenter le bâtiment réel au moyen de modèles tout en garantissant une facilité d'utilisation (Figure 2.2).

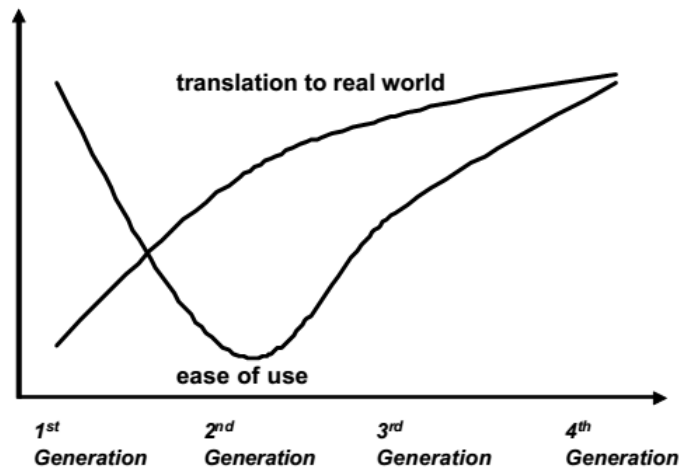


FIGURE 2.2 – Évolution des outils et aptitudes à décrire le système réel' repris de (Clarke, 2001)

Jusqu'au milieu des années 70, les calculs simplifiés et statiques ont été utilisés pour estimer la consommation d'énergie dans les bâtiments (Clarke, 2001). La complexité du bâtiment ou d'une de ses composantes est réduite en simplifiant les parties du système avec des conditions statiques. Les progrès réalisés dans les techniques de simulation et l'accès aux outils informatiques ont conduit au développement rapide des outils de simulation de la performance thermique du bâtiment. Clarke (2001) a résumé cette évolution des outils de simulation du bâtiment en quatre générations.

Les outils de 1^{re} génération sont des manuels orientés vers l'implémentation informatique, et sont simplistes. Ils ne cherchent pas à représenter fidèlement les flux d'énergie et de masse qui se produisent dans un bâtiment réel, mais à fournir une indication générale sur des critères de performance.

Les outils de simulation de 2^{ème} génération ont émergé au milieu des années soixante-dix. Ils ont introduit la dynamique dans le processus d'évaluation en tentant d'imiter les conditions physiques réels dans un bâtiment, en particulier sur les éléments de l'enveloppe. Cependant, l'analyse est découplée par rapport à l'aérodynamique où des modèles statiques sont utilisés. Les premières implémentations ne peuvent pas être utilisées dans la conception en raison des interfaces utilisateurs limitées et des exigences en termes de temps de calcul.

2.2. La simulation des performances énergétiques du bâtiment

Les outils de 3^{ème} génération apparaissent au milieu des années quatre-vingt avec l'apparition d'outils informatiques performants. Ils ont marqué le début de la modélisation intégrée où les aspects thermique, optique et acoustique sont considérés ensemble.

Au milieu des années 90, le travail sur la modélisation intégrée s'est poursuivi avec l'ajout de programmes d'interopérabilité sur le traitement des données, démarquant ainsi les outils de 4^{ème} génération. Avec le nombre d'utilisateurs croissant pendant cette période, de nouveaux développements s'opèrent notamment au niveau des interfaces utilisateurs, du contrôle de la qualité des applications et de la formation des utilisateurs. La simulation de l'écoulement de l'air est bien intégrée et ces outils de 4^{ème} génération sont couramment utilisés dans la conception du bâtiment.

Les outils de simulation des performances énergétiques sont en constante évolution, et au niveau international des organismes comme IBPSA³ et AIE⁴ encadrent cette évolution à travers des projets internationaux (BESTEST, PASSYS, IEA-EBC⁵).

2.2.3 La simulation : outil d'aide à la conception

L'évolution des outils de simulation des performances énergétiques dans le bâtiment permet de disposer de modèles détaillés prenant en compte les connaissances actuelles des phénomènes physiques en interactions dans le bâtiment. Les outils de simulation permettent de faire des études de faisabilité technique en comparant différentes solutions techniques sur une construction (enveloppe, isolations, menuiseries, traitement des ponts thermiques, prises en compte des énergies renouvelables, systèmes, fluides...). Ils permettent aussi de mener des études diagnostiques précises, afin de préconiser des mesures correctives et de chiffrer des économies d'énergies. Ils sont vus comme des outils d'aide à la conception au profit des acteurs du bâtiment.

Leurs domaines d'application sont les suivants :

- Chauffage et climatisation (dimensionnement) ;
- Diagnostic de performance énergétique pour la conception et la rénovation ;
- Gestion énergétique des bâtiments et le contrôle ;
- Analyse des coûts et du cycle de vie ;
- Étude des options d'efficacité énergétique ;
- Support pour la définition d'indices et standards au profit des décideurs.

Les outils BPS peuvent être appliqués dans l'analyse d'un bâtiment tout au long de son cycle de vie : la conception, la construction, l'exploitation, la maintenance et la gestion (Attia, 2010; Hensen, 1993, 2004; Hensen and Augenbroe, 2004; Hensen,

3. International Building Performance Simulation Association

4. Agence Internationale de l'Énergie

5. International Energy Agency-Energy in Building Communities

Chapitre 2. Une approche innovante de la simulation des performances énergétiques du bâtiment

Lamberts, and Negrao, 2002; Hong, Chou, and Bong, 2000; Høseggen, Wachenfeldt, and Hanssen, 2008). Les outils BPS performants nécessitent l'utilisation d'outils d'ingénierie et sont très peu utilisés en dehors des experts dans le domaine.

2.2.4 La simulation : étude du comportement des bâtiments existants

La simulation de modèles de connaissance détaillés est un moyen pour étudier les comportements des bâtiments existants tel que le niveau de confort, l'analyse des postes de consommations et les erreurs de conception entre autres, l'objectif étant d'identifier et d'appliquer les meilleures stratégies de gestion. Il s'agit aussi de comprendre les raisons pour lesquelles les performances d'un bâtiment ne suivent pas les trajectoires voulues. Il est communément admis que l'utilisation d'un modèle de simulation pour analyser un bâtiment existant nécessite que le modèle soit capable de représenter le comportement réel. Cela implique souvent la calibration qui est un processus d'ajustement des paramètres du modèle (les différentes approches et méthodes de calibration de modèles BPS seront présentées dans le chapitre 3). Ces types d'études s'avèrent nécessaires et souvent indispensables pour répondre aux faiblesses de l'expérimentation et la complexité d'un bâtiment réel. En effet, la simulation dans ce contexte peut permettre de répondre aux inconvénients suivants de l'expérimentation (Hensen, 1991; Hong, Chou, and Bong, 2000; Coakley, Raftery, and Keane, 2014) :

- L'expérimentation est coûteuse en termes de temps, de mise en place et d'argent ;
- Certains paramètres physiques nécessitent parfois de longues périodes d'observation pour obtenir des résultats ;
- L'inaccessibilité de certaines variables du système réel par la mesure (e.g. champ de températures, flux thermique d'énergie, champ de vitesse d'air,...) ;

2.2.5 Freins à l'utilisation de la simulation dans le bâtiment

Du point de vue de nombreux architectes (acteurs ayant un impact décisionnel primordial dans le secteur), la plupart des outils BPS performants sont complexes et lourds (Hong, Zhang, and Jiang, 1997; Attia, 2012). Les principaux freins au développement et l'utilisation d'outils de simulation énergétique du bâtiment sont le faible marché et le rapport "coût/temps de développement" très élevé. Papamichael and Pal (2002) classent les freins à l'émergence d'un outil BPS dans la phase de conception en deux types, freins dus aux outils et freins utilisateurs. A cela on peut ajouter les difficultés dans l'utilisation de ces outils pour l'étude des bâtiments existants.

2.2. La simulation des performances énergétiques du bâtiment

2.2.5.1 Freins dus aux outils

Théoriquement, il est possible de développer des outils logiciels qui permettront la prise en compte du bâtiment et de toutes ses composantes, qui soient rapides et faciles d'utilisation. Toutefois, ces outils nécessitent des efforts de développement importants, équivalents aux efforts déployés pour le développement de logiciels commerciaux. Malheureusement, le manque d'un réel marché de ces outils n'attire pas les développeurs de logiciels commerciaux (Hensen, 1991). La plupart des efforts actuels sont principalement supportés par des fonds publics et sont limités en ce qui concerne les ressources allouées pour le développement et la maintenance des outils.

2.2.5.2 Freins utilisateurs

Les principaux obstacles à l'utilisation des outils actuellement disponibles sont la facilité d'utilisation (préparation de l'entrée, exécution, examen des résultats), les capacités de modélisation (moteur de simulation), la disponibilité et la compatibilité des données d'entrée. Pour Morbitzer (2003) le plus important pour l'utilisation des outils, est l'interface graphique utilisateur qui doit faciliter la manipulation des données d'entrée et de sortie et exposer les fonctionnalités de l'outil de simulation. Les outils les plus performants de nos jours ne disposent pas d'interfaces graphiques conviviales, et ou ne permettent pas d'exposer toute les fonctionnalités. En effet, sur 417 outils BPS dénombrés en 2012 par le DOE⁶ seules 40 étaient destinés aux architectes (Attia et al., 2012). Les utilisateurs avec des connaissances limitées dans les aspects liés à l'énergie et l'environnement de la conception du bâtiment se tournent alors vers des outils simplifiés, où ils se sentent plus compétents.

2.2.5.3 Freins à l'utilisation de simulation calibrés

L'utilisation des outils BPS pour la calibration est confrontée au manque de standards dans le domaine. En effet, il n'y a pas de normes explicites. Un standard comme l'ASHRAE Guideline (ASHRAE, 2002) spécifie une plage de tolérance dans le lequel le modèle peut être considéré comme calibré pour des simulations annuelles et des consommations globales d'énergies. Ces standards ne prennent pas en compte les incertitudes et la qualité des données d'entrées mais plutôt les écarts au niveau des paramètres environnementaux (Andre, 2013; Coakley, Raftery, and Keane, 2014). Le manque d'outils et de méthodes automatisés pour le processus de calibration constitue de même une faiblesse. Le développement des outils de simulation est un processus sans fin, parce qu'il y a toujours de nouvelles technologies et principes à prendre en compte. En outre, la baisse des coûts des équipements

6. Le département américain de l'énergie

informatiques et leurs améliorations continues, ouvrent de nouvelles opportunités pour améliorer la modélisation et la précision des prédictions.

2.3 Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

2.3.1 Les enjeux de l'interopérabilité

2.3.1.1 Approche de modélisation et simulation hétérogène dans le bâtiment

De nombreux outils de simulation ont été développés ces dernières décennies. Il n'existe pas d'outils complets qui permettent de simuler un bâtiment dans toute sa globalité et durant les différentes phases de vie de ce bâtiment. Ces outils sont très souvent orientés métiers et propriétaires et n'ont pas le même degré de description de tout le système dans un même environnement.

Face à ce constat, on assiste à une autre approche de la simulation de la performance des bâtiments qui consiste à faire inter-opérer les différents environnements spécialisés et donc tirer profit des outils existants. L'approche consiste à ne plus décrire le bâtiment dans sa globalité et dans un seul environnement, mais plutôt à le considérer comme un système complexe et hétérogène alliant à la fois des aspects thermiques, électriques aérauliques, automatiques et sociologiques, pouvant être décomposés en sous-systèmes (Figure 2.3).

Avec la modélisation hétérogène, la définition d'un système consiste en une multitude de modèles des différents sous-systèmes. L'intérêt de ce type de modélisation est que chaque sous système peut être exécuté, conçu et validé séparément en utilisant le langage le plus approprié, le système complet étant validé au final par des techniques d'interopérabilité. Selon l'IEEE⁷, l'interopérabilité se définit comme « la capacité de deux ou plusieurs systèmes ou composants d'échanger l'information et d'utiliser cette information qui a été échangée ». L'interopérabilité peut consister en l'exportation des équations d'un système vers un autre pour permettre une résolution par un solveur unique ou le fonctionnement de plusieurs solveurs qui interagissent. L'interopérabilité est une stratégie qui nécessite moins de travail à faire en comparaison aux solutions qui nécessitent des modifications complexes et exhaustives à apporter au code pour réaliser une simulation globale du bâtiment Hensen (2004).

Ainsi, un critère important dans le choix des outils, est leur capacité d'inter-opérer. Il devient donc indispensable d'étudier au préalable les capacités des outils à pouvoir échanger des modèles en import et export ainsi qu'à offrir des interfaces de

7. Institute of Electrical and Electronics Engineers

2.3. Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

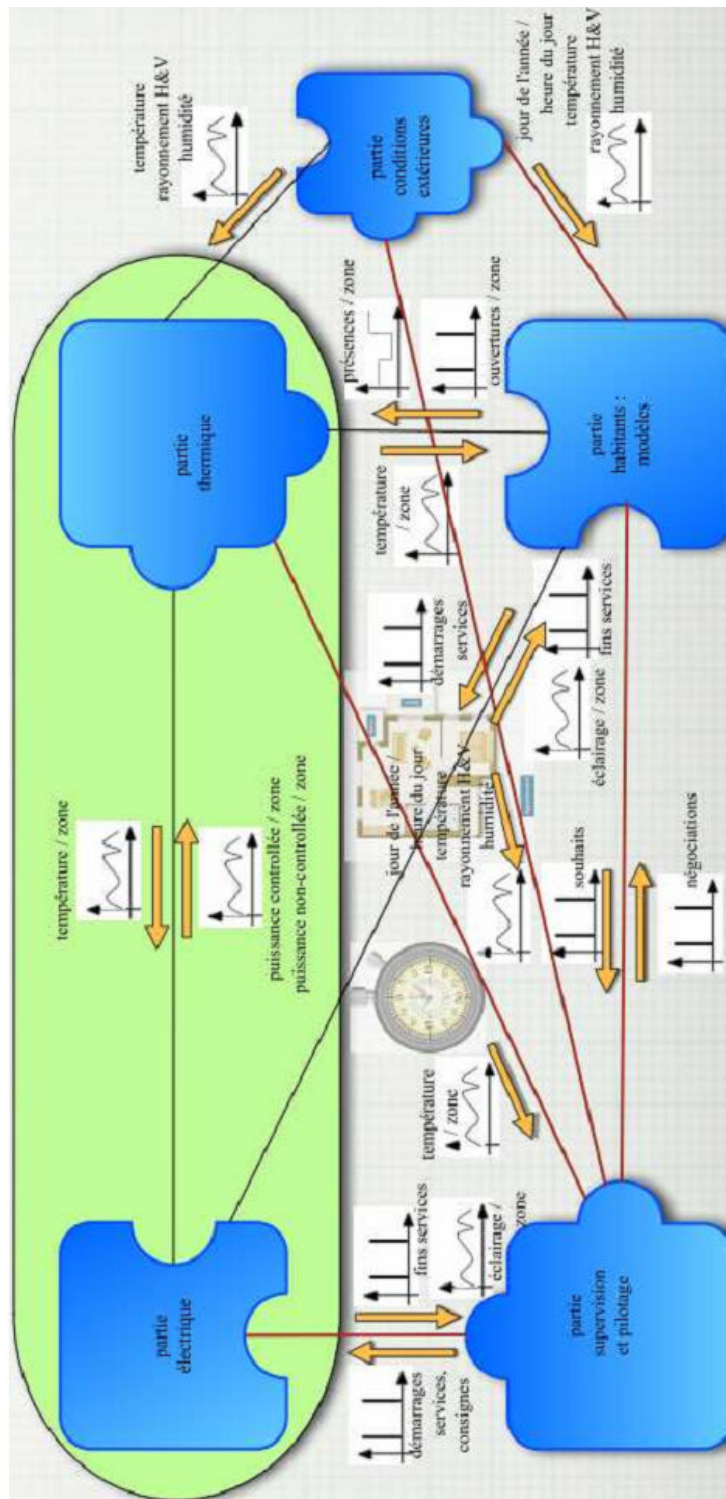


FIGURE 2.3 – Les domaines interagissant dans le bâtiment (Projet ANR-SIMINTHEC)

Chapitre 2. Une approche innovante de la simulation des performances énergétiques du bâtiment

communication pour leurs pilotages externes. En effet, cette approche de simulation présente plusieurs avantages par rapport à une simulation classique (Trcka and Hensen, 2010; M. Trcka, 2006.). Parmi ces avantages on peut citer :

- Le travail collaboratif permettant d'utiliser plusieurs outils à la fois, spécialisés dans des domaines différents, et dépassant ainsi les limitations imposées par l'utilisation d'un outil unique en termes de capacité de modélisation et de simulation.
- La combinaison de plusieurs paradigmes de modélisation, niveaux de finesse (mono zone, éléments finis, CFD) et méthodes de résolution.
- Le prototypage facile de nouveaux systèmes grâce aux possibilités accrues d'interopérabilité entre des outils métiers.
- La facilité d'entretien et d'amélioration des modèles qui se font généralement depuis leurs propres outils, et qui sont ensuite réintégrés dynamiquement au système via la co-simulation.

Cependant, jusqu'à récemment, il n'existait pas de cadre général normalisé pour l'interopérabilité des environnements de simulation dans le domaine du bâtiment, ni des directives pour la mise en œuvre de la co-simulation en ce qui concerne sa stabilité et sa précision. La communauté scientifique se penche de plus en plus sur les techniques d'interopérabilité avec application au bâtiment. Cela se manifeste par les projets ANR-SIMINTHEC et PLUMES en France et au niveau international par l'AIE-EBC-annexe 60 de "*Design and operation of building and community energy systems based on Modelica and Functional Mockup Interface*". Les outils d'interopérabilité ainsi que les méthodologies qui leur sont associées représentent un domaine de recherche en vogue et demeurent le point de départ de la conception des systèmes hétérogènes et multi-langages (Jerraya et al., 1997). Les outils ont émergé pour maîtriser la complexité croissante des systèmes et pour répondre aux critères de performance et de temps exigés en s'inspirant des outils dans le domaine de l'automobile et de l'électronique. Les solutions d'interopérabilité envisagées pour le bâtiment de nos jours en sont issues. Selon (Hensen, 2004) les approches d'interopérabilité dans le domaine du bâtiment peuvent être classées en trois principales catégories :

- L'interopérabilité des données des modèles.
- L'interopérabilité des processus des modèles.
- Coopération des processus et des modèles.

2.3.1.2 L'interopérabilité des données des modèles

L'interopérabilité des données est orientée sur le transfert de données entre les programmes au niveau des modèles. Elle peut être réalisée par une base de données qui stocke et gère le transfert des informations des modèles entre les environnements de modélisation comme le standard IFC(*Industry Foundation Classes*) (Bazjanac

2.3. Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

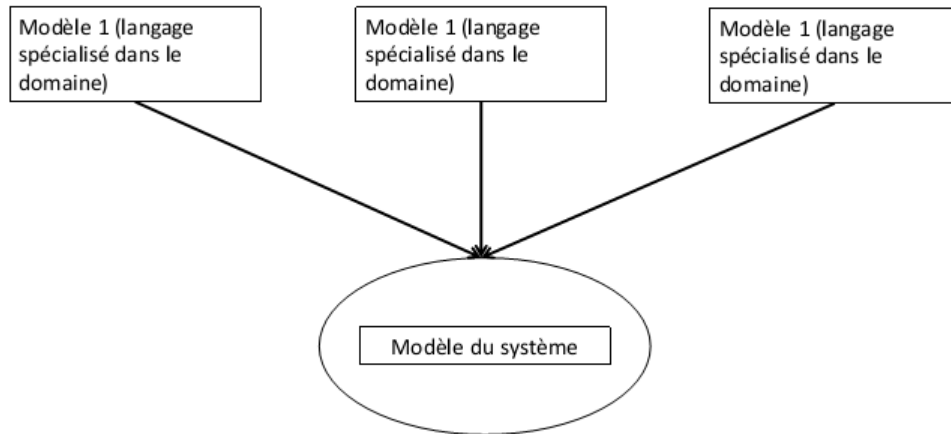


FIGURE 2.4 – co-simulation monomoteur

and Crawley, 1999; Augenbroe, 2002, 2003). L'IFC est un format de fichier orienté objet utilisé dans l'industrie de la construction pour échanger des données entre les logiciels les plus utilisés dans les différentes phases de vie du bâtiment. Ces stratégies permettent de faciliter l'échange des informations de modèles en créant le modèle une fois. Elles ne peuvent intervenir qu'avant la phase de simulation et donc ne répondent pas totalement aux besoins d'interopérabilité des BPS.

2.3.1.3 L'interopérabilité des processus des modèles ou co-simulation mono-moteur

Cette approche consiste à intégrer les sous-systèmes à simuler en une représentation unifiée qui sera utilisée pour la vérification et la conception du comportement global du système (Figure 2.4). Cette vérification qui se fait par une simple compilation et exécution, permet d'avoir une complète cohérence et une vérification parfaite de la définition des interconnexions (marrec, 2000). Cette méthode comporte des aspects très attractifs à condition que :

- les applications ne soient pas concurrentes ;
- la génération du code intermédiaire soit facilement et rapidement réalisable pour chaque sous-système.

L'avantage de cette méthode est qu'elle peut être très rapide à condition que la chaîne de compilation du langage intermédiaire soit performante au niveau exécution. Des efforts d'harmonisation permettent de disposer de standards et d'outils pour la mise en œuvre de ce concept. Ces solutions sont toujours en cours de perfectionnement.

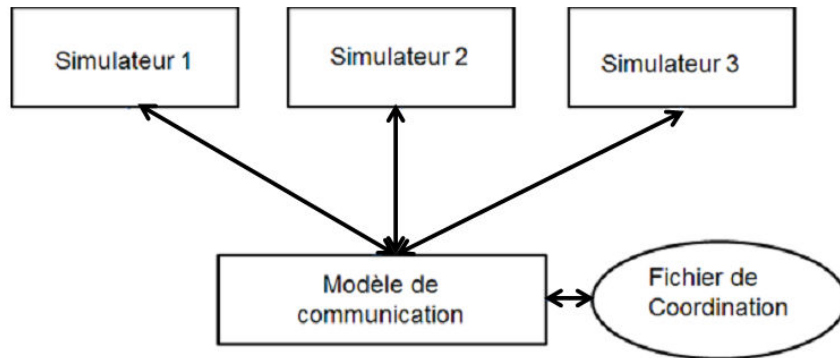


FIGURE 2.5 – Co-simulation multimoteur

2.3.1.4 L'interopérabilité des processus ou co-simulation multimoteur

La co-simulation multimoteur consiste à fournir un moteur de simulation pour chaque sous-système impliqué dans le processus de co-simulation (Figure 2.5). Chaque sous-système est simulé par un simulateur approprié. La co-simulation devient un échange de données entre simulateurs dont le cheminement est défini dans un fichier de coordination. L'avantage d'une telle méthode est qu'elle permet l'utilisation des outils existants pour réaliser la simulation.

Néanmoins, il faut s'assurer que les simulateurs placés dans l'environnement de co-simulation permettent d'extraire leurs données de simulation vers l'extérieur. Il faut réaliser des modules d'entrées/sorties permettant d'interfacer le simulateur et le modèle de communication. Le fichier de coordination inclus dans l'environnement doit pouvoir identifier l'ensemble des données qui transitent dans le support de communication. Cependant, elle implique une nette perte de performance en comparaison à une méthode comme l'échange de modèle. Les verrous de cette méthode sont le nombre pléthorique de modèles et leur hétérogénéité ainsi que les pas de temps de simulation des différents simulateurs. Les solutions envisagées pour le bâtiment issues de cette approche proviennent en majorité d'autres communautés :

- Modelica et ses différentes bibliothèques multimétier [Wetter \(2009\)](#) ;
- BCVTB ([Wetter, 2011a](#)) (*Building Controls Virtual Test Bed*) ;
- FMI [Modelisar \(2010a\)](#) (*Functional Mockup Interface*) pour la co-simulation et l'échange de modèle.

Seul Le BCVTB est un outil initialement orienté bâtiment. Le FMI standardise la façon dont des programmes de simulation différents peuvent communiquer les uns avec les autres durant une simulation. Il normalise également une interface de programmation d'application pour l'inclusion de la co-simulation dans les environnements de simulation. Cette norme est maintenant prise en charge par plus de 20 environnements logiciels, y compris des outils pour la simulation énergétique des

2.3. Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

bâtiments. Ce standard répond à nos attentes d'interopérabilité.

2.3.1.5 Le Functional Mock-up Interface (FMI)

Le but du FMI est d'unifier la description des modèles générés à partir des outils de simulation basés sur le langage Modelica. Un modèle exporté est appelé FMU (Functional Mock-up Unit) et se présente sous une forme de fichier zip. Ce fichier peut contenir les éléments suivants :

- Le fichier de description de modèle FMI.
- Les codes C, contenant les équations sous forme causals, y compris des fichiers DLL et binaires.
- Des données supplémentaires (tels que des tables, diagrammes) dans des formats spécifiques au FMU.

Deux types de modèles peuvent être générés à travers l'interface FMI : les modèles du type FMI pour l'échange de modèle (Figure 2.6) et les modèles du type FMI pour la co-simulation (Figure 2.7). Ainsi le standard FMI peut permettre de réaliser les co-simulations monomoteur et multimoteur. Le FMI pour l'échange de modèle spécifie comment un environnement de modélisation peut générer du code C d'un modèle dynamique d'un système et être utilisé par d'autres environnements de modélisation et de simulation (Figure 2.9). Le FMI pour la co-simulation fournit un standard d'interface pour coupler deux ou plusieurs outils de simulation dans un environnement de co-simulation. Dans ce cas le FMU embarque le solveur et des fichiers exécutables pour la mise en œuvre du couplage pour la co-simulation (Figure 2.7).

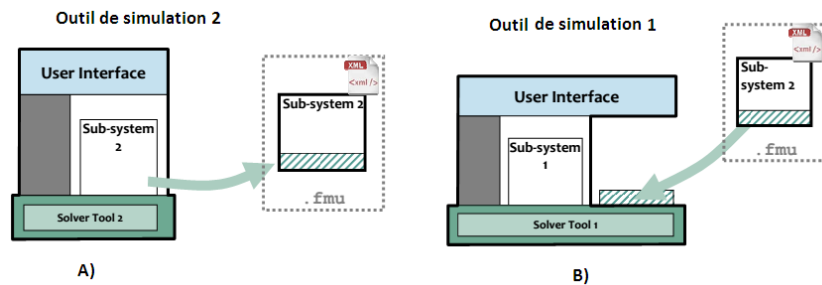


FIGURE 2.6 – FMI pour l'échange de modèle : A) export de modèles et B) Import de modèles

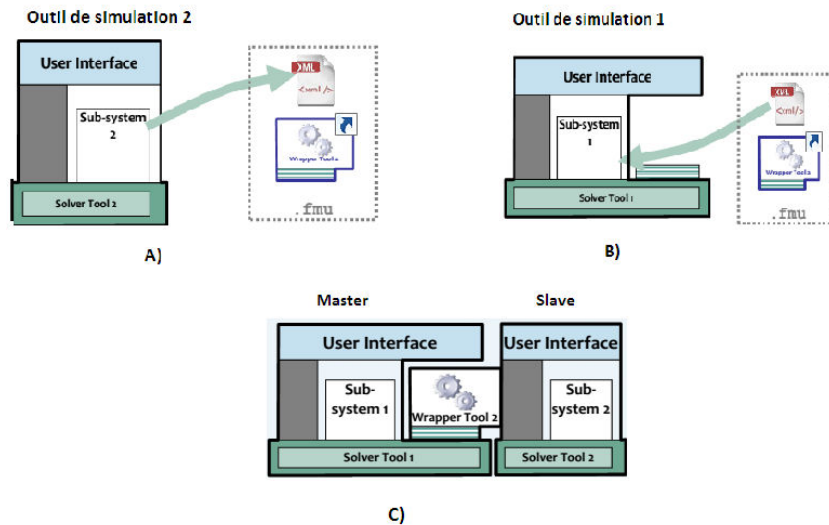


FIGURE 2.7 – FMI pour la simulation : A) export de modèles B) Import de modèles C) Co-simulation sur un poste de travail

2.3.2 Les outils les plus utilisés au niveau international

Les besoins en termes d'outils de simulation changent en fonction de l'état d'avancement d'un projet, ce qui explique la grande diversité des outils qui existent pour simuler le comportement énergétique des bâtiments. Dans une phase d'avant-projet l'utilisation des outils de simulation consistera à obtenir une tendance de la performance énergétique. On utilise alors des outils simples. Ensuite pour des étapes plus avancées du projet, l'outil de simulation doit permettre d'optimiser l'enveloppe du bâtiment pour réduire les besoins énergétiques. Les outils utilisés doivent être capables de dimensionner des équipements énergétiques et une modélisation fine du bâtiment peut être nécessaire (Tittlein, 2008). Enfin pendant la phase d'exploitation, des outils plus complets sont nécessaires pour les études diagnostiques.

Un certain nombre d'outils ont été mis en œuvre ces dernières années. Dans le répertoire des outils élaboré par US-DOE⁸, 417⁹ outils liés à l'évaluation de l'efficacité énergétique, aux énergies renouvelables ou au développement durable des bâtiments y sont recensés. Les besoins en modèles de connaissance dynamique du bâtiment pour notre étude, nous guide vers des outils implémentant ces approches.

Nous présentons ici, les outils de simulation qui sont les plus récurrents dans la littérature et qui intègrent nos besoins en terme modélisation. Les outils orientés objet qui suscite un réel intérêt dans la communauté du bâtiment sont présentés

8. Departement Of Energy (Etats Unis d'Amérique)

9. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/

2.3. Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

à travers le standard Modelica. La liste des outils présentée ci-après est indicative mais non exhaustive. Entre autres on peut citer les outils suivant :

Trnsys (Transient System Simulation Tool) Il est développé par l'université de Wisconsin et une entreprise privée TESS, le groupe TransSolar en Allemagne et le CSTB en France interviennent sur la diffusion du logiciel et l'interface pour les utilisateurs. C'est un environnement modulaire et très flexible qui inclut une interface graphique et une librairie de composants pour modéliser les systèmes énergétiques appliqués aux bâtiments. Il est plus orienté équipements techniques et le bâtiment se résume à un type.

ESP-r C'est un outil développé à la base par des chercheurs de l'université de Strathclyde à Glasgow (Ecosse) depuis 1974 et a été rendu "open source" récemment. Il permet la résolution de problèmes de thermique, d'acoustique et d'éclairage et a fait l'objet de nombreuses validations ([Strachan, 2008](#)) principalement dans le cadre d'annexes de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE). Le manque de facilité de prise en main et de base de données pour les matériaux en font un outil plus adapté à la recherche qu'à l'utilisation en bureau d'études.

Modelica Modelica est un langage orienté objet issu des travaux du projet européen "ESPRIT" en 1997. L'association MODELICA fut fondée pour soutenir le développement du langage et le développement de la bibliothèque Modelica Standard. La caractéristique de Modelica réside en la combinaison d'un langage de modélisation basé sur les équations et d'un éditeur graphique qui permet la conception de bibliothèques de modèles ([Tiller, 2002](#); [Viklund and Fritzson, 1995](#); [Fritzson, 2004](#); [Fritzson, 2006](#)). Ces modèles prédéfinis peuvent être utilisés graphiquement pour assembler des systèmes. Elle contient des modèles de composants, dans plusieurs domaines. Plusieurs environnements implémentent entièrement Modelica (Dymola, MathModelica, JModelica) et certains autres (MapleSim et AMESim) partiellement. Ces dernières années des efforts ont été entrepris pour adapter Modelica aux bâtiments. Ainsi une bibliothèque libre "Modelica building Library" ([Wetter, 2011a](#)) basée sur la sous-bibliothèque Modelica.Fluid de la bibliothèque standard a été élaborée. Elle est conçue pour la modélisation du bâtiment et de ses systèmes énergétiques. Développée par le Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) en 2008, elle est fréquemment maintenue. La bibliothèque contient des modèles de composants dynamiques qui sont applicables pour des analyses rapides des systèmes énergétiques dans le bâtiment. Elle contient aussi une interface pour la co-simulation avec d'autres environnements comme (Energy-plus, Matlab) à travers le BCVTB et prend en compte le standard FMI.

Chapitre 2. Une approche innovante de la simulation des performances énergétiques du bâtiment

EnergyPlus EnergyPlus fut développé aux États Unis grâce à la volonté du département de l'énergie de recentrer ses financements autour d'un seul outil de simulation des bâtiments. Il s'agit d'un code validé à l'aide des tests de IEA BESTEST. Il se comporte comme un gestionnaire de simulation qui utilise plusieurs modules pour estimer les besoins en énergie des bâtiments (Figure 2.8). Le cœur du modèle de bâtiment est basé sur deux anciens programmes de simulation monolithiques du DOE : BLAST et DOE-2 et le langage de programmation FORTRAN 90. Il ne

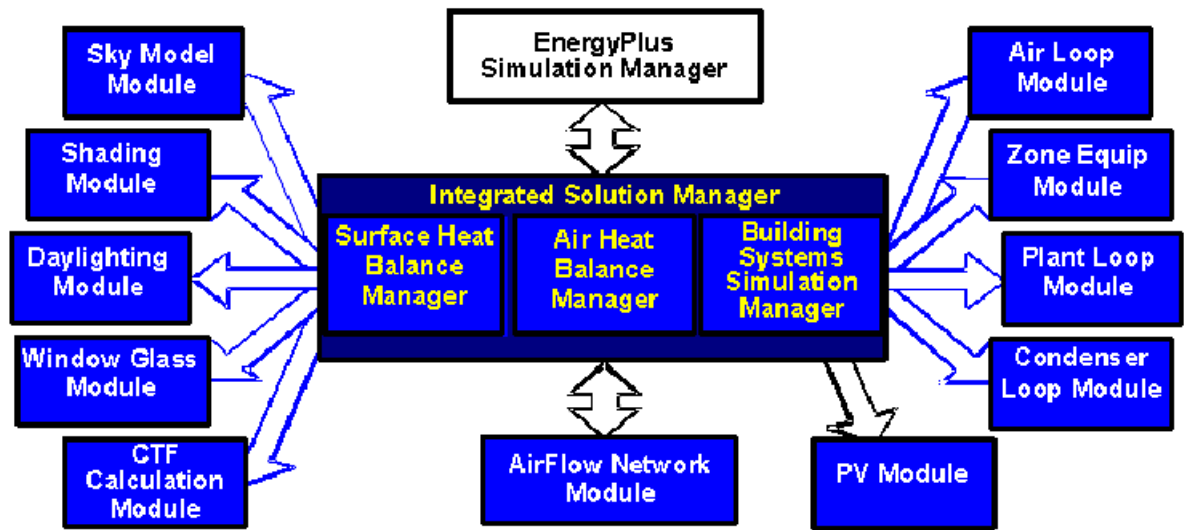


FIGURE 2.8 – Le programme EnergyPlus

possède pas d'interface graphique propre mais, plusieurs interfaces sont disponibles sur le marché et un plug-in "OpenStudio" a été développé récemment pour pouvoir utiliser le modèleur 3D GOOGLE SKETCH'UP pour la saisie données d'entrée et le traitement des résultats de la simulation.

EnergyPlus fournit deux méthodes pour le calcul des éclaircissements : une méthode "DElight" basé sur la technique de radiosité et une méthode détaillée basée sur la technique de "Split-flux". la technique "Split-flux" est utilisée pour nos simulations en raison de sa capacité à traiter avec des fenêtres complexes et des dispositifs de protections solaires (Winkelmann and Selkowitz, 1985) (ANNEXE 2). De plus, elle donne de meilleurs résultats pour les pièces dont la forme s'approche du cube. Le modèle du ciel est basé sur le modèle empirique décrit par Perez et al. (1990). En plus de posséder un module pour les études paramétriques, un outil comme Genopt (Wetter, 2011b) peut être couplé permettant de mener des études d'optimisation. Il intègre des interfaces d'interopérabilité comme le BCVTB (Wetter, 2011a) et le standard FMI (Nouidui, Wetter, and Zuo, 2014). Cet outil sera retenu pour la

2.3. Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

simulation dynamique des bâtiments et les Annexes 1, 2 et 3 décrivent les méthodes implémentées dans le programme dont on a besoin pour nos études.

Dymola Dymola (*DYnamic MOdeling LABoratory*) est un environnement de simulation qui utilise le langage de programmation orienté objet Modelica en lui apportant un assembleur et un solveur d'équations très efficace. C'est un environnement basé sur les systèmes d'équations très utilisé dans un grand nombre de domaines scientifiques. La méthode d'assemblage des équations qu'il utilise et qui n'est pas complètement publiée le rend particulièrement performant par rapport aux autres environnements Modelica. Dymola est particulièrement adapté à la simulation de systèmes complexes qui mettent en jeu des phénomènes ayant trait aux domaines scientifiques. L'implémentation du langage Modelica sous Dymola, permet de créer ses propres bibliothèques de composants ainsi que l'adaptation des modèles existants. Il présente des interfaces implémentant le standard FMI en import comme en export.

2.3.3 Les besoins d'optimisation

Les concepteurs de bâtiment ont de plus en plus besoin d'utiliser les outils de simulation pour analyser les performances énergétiques, à des fins comme la maîtrise des consommations d'énergie, la réduction d'impact environnemental et le confort dans l'habitat par exemple. Une approche comme l'étude paramétrique où l'on fait varier un paramètre en maintenant tous les autres inchangés peut être employée. Cette méthode a un coût en temps élevé au fur et à mesure que le modèle devient complexe comme le cas des modèles de connaissance détaillée. Dans le but de trouver des solutions optimales et économes en termes de temps de mise en œuvre, des procédures ont été mise en place. Ces procédures utilisent des méthodes de recherches itératives pour trouver des solutions aux différents cas. Il s'agit des méthodes numériques d'optimisation.

L'application de ces méthodes d'optimisation au secteur de la simulation des performances du bâtiment a été pris en compte très tôt dès les années quatre-vingt mais, c'est à partir des années 2000 qu'elles eurent un regain d'intérêt (Nguyen, Reiter, and Rigo, 2014; Evins, 2013). Nguyen, Reiter, and Rigo (2014) relèvent une augmentation du nombre de rapports scientifiques sur l'optimisation des modèles dans le bâtiment à partir de la période de 2005 à nos jours. Ce qui traduit l'intérêt et l'importance accordé au développement et à l'application des méthodes numériques d'optimisation par la communauté du bâtiment dans le monde.

2.3.3.1 Présentation des algorithmes utilisés

Différents méthodes existent pour satisfaire les besoins de résolution des problèmes d'optimisation. On peut les classer en approches "population" et méthodes de recherche directe (Mathieu, 2010).

Les approches population consistent à travailler avec un ensemble de solutions simultanément, et de les faire évoluer graduellement. Ces méthodes permettent d'améliorer l'exploration de l'espace des solutions. On peut y inclure sans être exhaustif les méthodes suivantes :

- les algorithmes génétiques (AG) ;
- les algorithmes par colonies de fourmi ;
- les algorithmes par essaim de particules (*Particle Swarm Optimisation PSO*) ;
- les algorithmes à estimation de distribution.

Les méthodes de recherche directe également appelées approches de recherche locale. Ces algorithmes partent d'une solution initiale et s'en éloignent progressivement, pour réaliser un parcours progressif dans l'espace des solutions. Luersen (2004) les classe en trois sous-groupes :

- les méthodes de recherche par motifs généralisés (*generalized pattern search GPS*) ;
- les méthodes des directions conjuguées ;
- Les méthodes basées sur la figure géométrique d'un simplexe.

De nombreuses méthodes d'optimisation ont été comparées par (Wetter and J.Wright, 2004) dont l'algorithme de recherche par motifs généralisés (GPS) et Hooke-Jeeves (HJ), l'optimisation par essaim de particules (PSO), le PSO et GP-SHJ, un algorithme génétique etc. Ils constatent que des discontinuités dans la fonction objectif causées par le solveur d'EnergyPlus rendent certains algorithmes peu performants. Les meilleures solutions ont été trouvées en utilisant l'algorithme hybride PSO-GPSHJ mais l'algorithme génétique effectue presque aussi bien en peu d'itérations. De ce constat nous utiliserons les algorithmes PSO et GPSHJ car ils permettent de réaliser une bonne performance avec quelques itérations et du fait de leurs récurrences d'emploi dans le domaine du bâtiment (Evins, 2013; Wetter and J.Wright, 2004; Wetter and Polak, 2005).

2.3.3.2 Description des algorithmes GPS et PSO

L'algorithme Generalized Pattern Search (GPS) Les algorithmes de recherche par motifs généralisés sont une généralisation de la méthode de Hooke-Jeeves (Hooke and Jeeves, 1961). Les GPS sont caractérisés par une série de dé-

2.3. Description des outils et nouvelles approches de simulation thermique du bâtiment

placements exploratoires autour du point courant. Ces déplacements forment des motifs qui présentent une disposition invariable d'où le mot motifs. A chaque itération la fonction coût est évaluée sur les points du motif. Si une amélioration est trouvée, le point associé est accepté comme nouveau point courant, et la taille du prochain motif est conservée ou augmentée. Sinon, la taille du nouveau motif, généré autour de l'ancien point courant, est réduite. Les GPS présentent des propriétés de convergence robustes pour des fonctions continues, différentiables et bornées.

L'algorithme Particle Swarm Optimisation (PSO) L'optimisation par essaim de particules est une technique d'optimisation stochastique à base de population introduite par [Eberhart and Kennedy. \(1995\)](#). Cet algorithme s'inspire du monde du vivant et s'appuie notamment sur un modèle développé par le biologiste Craig Reynolds à la fin des années 1980, permettant de simuler le déplacement d'un groupe d'oiseaux. Intuitivement, chaque jeu de paramètres définit la position d'une particule, qui se déplace dans l'espace avec une certaine vitesse. Au départ de l'algorithme chaque particule est positionnée (aléatoirement ou non) dans l'espace de recherche du problème. La meilleure des particules joue le rôle de pôle d'attraction, et infléchit les trajectoires des autres, qui restent partiellement attirées par leur meilleure position passée.

L'intérêt du PSO réside dans son applicabilité à une très large gamme de problèmes et la possibilité de traiter facilement des variables discrètes. Cependant, pour trouver un optimum, ils ont besoin d'un grand nombre d'évaluations de la fonction coût. Pour augmenter la vitesse de la recherche de l'algorithme PSO, on peut soit ajouter de la connaissance spécifique, soit le combiner à des algorithmes locaux (efficaces) et notamment les algorithmes GPS. La façon la plus simple de réaliser cette hybridation est d'effectuer les recherches en série, c'est-à-dire qu'une optimisation globale à coût limité par l'algorithme PSO est d'abord exécutée pour effectuer une recherche large, puis cette solution est raffinée par une recherche locale.

2.3.3.3 Choix du logiciel d'optimisation

Pour réaliser nos optimisations, on a choisi d'utiliser le logiciel GenOpt ([Wetter, 2011b](#)). GenOpt peut être couplé à n'importe quel logiciel de simulation à condition que les entrées et les sorties de ce logiciel soit des fichiers textes. GenOpt possède une librairie d'algorithmes d'optimisation locale (GPS) et globale (PSO) ainsi qu'un algorithme de couplage en série du GPS et du PSO (l'algorithme hybride GPSP-SOCCHJ). De plus, l'outil est écrit en langage JAVA ce qui assure une meilleure portabilité et permet à l'utilisateur de rajouter et de coder d'autres algorithmes.

La figure 2.9 montre le principe de couplage de GenOpt à EnergyPlus. Une fois GenOpt lancé les simulations se déroulent automatiquement. Les entrées des modèles de bâtiment sont générées par GenOpt en fonction des résultats de sorties

de EnergyPlus.

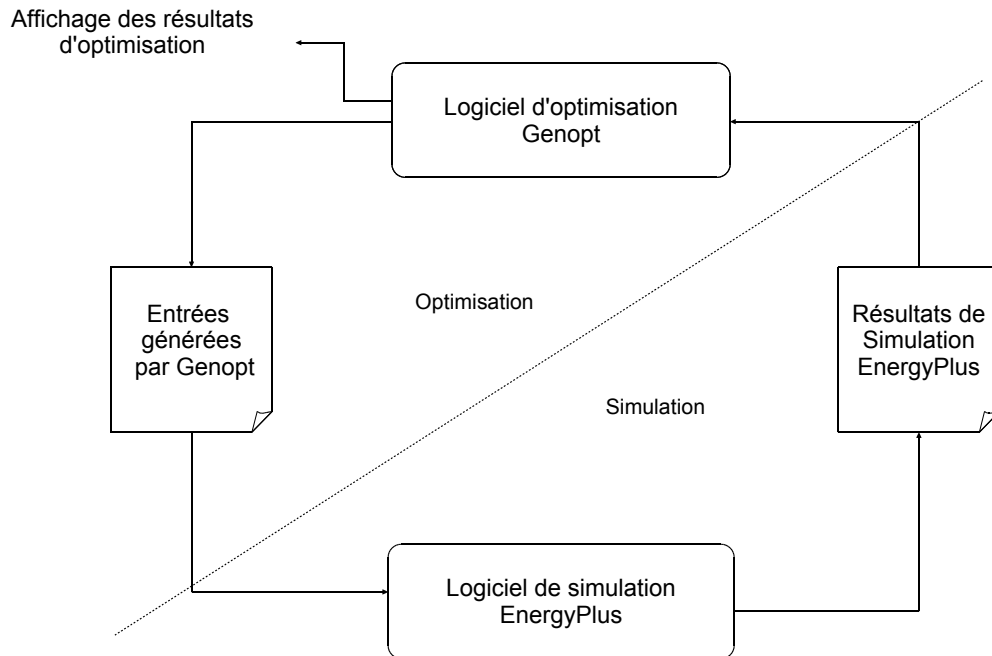


FIGURE 2.9 – Principe de couplage de Genopt et EnergyPlus

2.4 Conclusion

La simulation est primordiale pour le développement et l'adaptation des bâtiments face aux enjeux énergétiques et aux changements climatiques. La première section de cette partie a consisté à découvrir que le leitmotiv du développement des outils de simulation est le besoin de représenter la réalité afin de pouvoir mener des études diagnostics et pronostics. Malgré quelques limites à leurs utilisations par les acteurs du bâtiment, le nombre d'utilisateurs est en constante augmentation et plusieurs développements sont en cours pour prendre en compte les nouveaux besoins (environnement à base d'équations, études d'optimisation et interopérabilité). Il convient cependant de noter que la simulation et l'expérimentation sont complémentaires : expérimentation afin de découvrir de nouveaux phénomènes inconnus ou à des fins de validation, et simulation pour comprendre les interactions des composants connus d'un système. Pour la suite de nos travaux, le programme de

2.4. Conclusion

simulation dynamique EnergyPlus sera adopté pour nos études. Le standard FMI ainsi que Modelica-Dymola sont retenus pour les besoins d'interopérabilité. Les algorithmes PSO et GPS et l'outil Genopt ont été choisis dans le but de répondre aux besoins d'optimisation et d'études paramétriques. La problématique de validation des modèles fera l'objet du troisième chapitre à travers une étude diagnostique d'un logement type au Burkina Faso.

Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

Sommaire

3.1	Validation des résultats issus de la simulation de modèles détaillés du bâtiment	62
3.1.1	Les incertitudes dans le modèle	62
3.1.2	Les méthodologies de calibration des modèles détaillés du bâtiment	63
3.1.3	Les critères de validation	64
3.2	Descriptif de l'expérimentation	65
3.2.1	Le bâtiment expérimental	65
3.2.2	Monitoring du bâtiment	66
3.2.3	Sollicitations climatiques	68
3.3	Simulation du comportement thermique du bâtiment	68
3.3.1	Les hypothèses de modélisation	68
3.3.2	Confrontation entre simulation et expérimentation	72
3.4	Calibration du modèle détaillé du bâtiment	75
3.4.1	Analyse de sensibilité	76
3.4.2	Optimisation des paramètres du modèle	79
3.5	Application du modèle calibré à l'étude des transferts thermiques dans le bâtiment	82
3.6	Conclusion	87

Après avoir évoqué les différents développements liés à l'univers des environnements de simulation, ce chapitre est consacré à l'utilisation des outils numériques pour l'étude des bâtiments existants. Une expérimentation a été mise en place sur un bâtiment au Burkina Faso et les résultats sont comparés aux prédictions du modèle. Le modèle du bâtiment est implémenté et simulé avec EnergyPlus et des outils d'optimisation sont utilisés tout au long de la procédure.

3.1 Validation des résultats issus de la simulation de modèles détaillés du bâtiment

3.1.1 Les incertitudes dans le modèle

Les outils de simulation du bâtiment peuvent être utilisés pour mener des études sur les performances énergétiques afin d'apporter des solutions d'amélioration. Cependant, le grand nombre de paramètres que requièrent ces outils en entrée et les simplifications lors de la modélisation des phénomènes physiques affectent la fiabilité de la simulation, et sont à l'origine de biais entre mesures et prédictions. Ces écarts observés posent un problème d'incertitude des paramètres de la simulation notamment pour les modèles détaillés du bâtiment.

de Wit and Augenbroe (2002) classe les différentes sources d'incertitudes de la simulation thermique du bâtiment en quatre domaines que sont :

- les incertitudes de spécification : il peut s'agir d'une connaissance imparfaite de la géométrie, des propriétés des matériaux, les spécifications des systèmes CVC¹ ;
- Les incertitudes liées à la modélisation : il s'agit des hypothèses et des simplifications dans la description des phénomènes physiques complexes (formulation mathématique et algorithmique).
- Les incertitudes liées aux méthodes de résolution.
- Les incertitudes liées à l'exploitation : Il s'agit des informations relatives aux conditions extérieures du bâtiment, y compris les données météorologiques et le comportement des occupants.

Face à ce constat, la calibration des modèles du bâtiment est souvent utilisée dans l'optique d'avoir des modèles qui représentent mieux des comportements thermiques s'approchant de la réalité. Il est souvent possible de faire varier les paramètres d'entrée pour réduire les écarts mais, la difficulté réside dans le fait d'assurer une intervention judicieuse.

Dans certains cas, où les résidus ne sont pas grands et où la suppression de la cause du problème est difficile, une approche alternative est d'utiliser les données expérimentales pour calibrer le modèle. Par ce moyen, un modèle peut être calé pour représenter un système. Le modèle calibré peut ensuite être utilisé, avec prudence, et extrapolé pour l'étude du système sous d'autres conditions de fonctionnement.

1. Chauffage Ventilation Climatisation

3.1. Validation des résultats issus de la simulation de modèles détaillés du bâtiment

3.1.2 Les méthodologies de calibration des modèles détaillés du bâtiment

La calibration des modèles informatiques par des données mesurées réelles n'est pas une pratique nouvelle. Historiquement, la calibration a été une forme d'art qui repose fortement sur les connaissances de l'utilisateur, l'expérience, et des itérations. Diverses méthodes ont été proposées pour calibrer les programmes de simulation du bâtiment existant. Certains chercheurs et ingénieurs ont tenté de compiler les méthodes à travers des manuels afin de simplifier cette tâche. Toutefois, dans ce domaine il y a un manque de procédures complètes [Coakley, Raftery, and Keane \(2014\)](#). Les principales approches de la calibration d'un modèle pour la simulation énergétique du bâtiment ont d'abord été classées par [Clarke, Strachan, and Pernot \(1993\)](#) et adoptées par [Reddy \(2006\)](#). Les quatre approches sont les suivantes :

- Calibration sur intervention manuelle, itérative et pragmatique. Elle repose sur un processus itératif de comparaison entre les mesures et les résultats de simulation, où la calibration des paramètres est spécifique à l'utilisateur.
- Calibration sur une suite de graphes spécifiques comparatifs des données. Il s'agit d'identifier visuellement les différences entre prédictions et mesures.
- Calibration sur des tests spécifiques et des procédures analytiques. Ce sont des données spécifiques obtenues à l'aide de tests sur de courtes périodes de mesures. Ces mesures sont ensuite utilisées pour évaluer certains paramètres précis de la simulation. La procédure la plus répandue est la Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization (PSTAR) [Subbarao \(1988\)](#). Cette procédure repose sur un certain nombre de tests (test d'infiltrométrie, test de déperdition thermique, test de refroidissement) effectués sur une courte période afin d'étudier les effets liés aux climats et aux comportements des occupants.
- Méthodes analytiques/Méthodes mathématiques de calibration. Ce sont des procédures mathématiques pour automatiser la tâche de calibration. Des méthodes comme l'analyse de sensibilité et la quantification des incertitudes sont utilisées pour réduire le nombre de paramètres à optimiser. Par la suite des algorithmes d'optimisation peuvent être utilisés.

[Coakley, Raftery, and Keane \(2014\)](#) regroupe ces méthodes de calibration en méthodes manuelles et méthodes automatisées. Il relève des difficultés d'une automatisation complète de la procédure, rendant ainsi indispensable l'intervention de l'expert. Concernant la variable étudiée pendant la calibration, plusieurs études traitent de la calibration de modèles détaillés du bâtiment en se focalisant sur les consommations d'énergie par des mesures expérimentales ou à partir de l'analyse de factures d'électricité [Reddy \(2006\)](#); [Raftery, Keane, and Costa \(2011\)](#); [Spitz et al. \(2012\)](#); [Mustafaraj et al. \(2014\)](#); [Pedrini, Westphal, and Lamberts \(2002\)](#); [Silva and Ghisi \(2014\)](#). Seules quelques études traitent des bâtiments en évolution libre et

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

adoptent les paramètres de confort (comme la température et l'aéraulique) comme objectif de la calibration Tian and Love (2009); Spitz et al. (2012); Nguyen and Reiter (2012); Mateus, Pinto, and da Graça (2014); Perneti, Prada, and Baggio (2013); Krüger and Laroca (2010); Tahmasebi and Mahdavi (2012).

En effet la mesure de la température peut être impactée par des séries d'incertitudes et les interactions avec l'environnement intérieur ce qui nécessite un grand effort d'instrumentation. Cependant, pour des bâtiments en évolution libre (pas de système énergétique) comme dans notre cas, l'étude de la variable température est l'option la plus intéressante Perneti, Prada, and Baggio (2013). De ce constat, dans notre cas la calibration sera réalisée sur la température de l'air, et les températures de surface des faces intérieures des éléments de l'enveloppe (murs et toit).

3.1.3 Les critères de validation

Deux principales formes de représentation de la qualité des résultats de simulation sont proposées par Bou-Saada and Haberl (1995). Il s'agit d'indices statistiques que sont : l'erreur de biais moyenne normalisée (EBMN) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CVEQM). Par la suite nous utiliserons les termes anglais NMBE (Normal mean bias error) et CVRMSE (coefficient variation of Root Mean squared Error). Le NMBE permet d'évaluer la différence moyenne entre prédictions et mesures. Plus sa valeur tend vers zéro, mieux le modèle représente la réalité. Sa valeur peut être négative ou positive et il peut y avoir compensation sur une série de données. Le CVRMSE illustre la capacité du modèle à représenter la réalité. L'utilisation simultanée de ces deux indices, permet d'éviter le phénomène de compensation que peut engendrer le NMBE utilisé seul. (ASHRAE, 2002) donne des limites à ne pas dépasser de 5% et 15% pour un modèle calibré sur une base mensuelle ($n = 12$), et 10% et 30% pour un modèle calibré sur une base horaire ($n=8760$) respectivement pour le NMBE et le CVRMSE. L'IPMVP² IPMVP (2002) propose une valeur de 20% pour le NMBE mensuel et pour les plages horaires, 5% et 20% pour le NMBE et le CVRMSE respectivement.

$$NMBE = \frac{\sum_1^n (x_s^i - x_m^i)}{(n-1)\bar{x}_m} \quad (3.1)$$

$$CV(RMSE) = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_s^i - x_m^i)^2}{(n-1)}} \frac{1}{\bar{x}_m} \quad (3.2)$$

$$R^2 = \frac{\sum_1^n x_m^i x_s^i - n\bar{x}_m\bar{x}_s}{\sqrt{(\sum_1^n (x_m^i)^2 - n\bar{x}_m)(\sum_1^n (x_s^i)^2 - n\bar{x}_s)}} \quad (3.3)$$

2. International Performance Measurement and Verification Protocol

3.2. Descriptif de l'expérimentation

x_m les valeurs mesurées ; x_s les valeur prédites ; \bar{x}_s la valeur moyenne des données prédites ; \bar{x}_m la valeur moyenne des données mesurées.

TABLE 3.1 – Critères pour l'évaluation de la calibration

Standards	Critère mensuelle		Critère horaire	
	NMBE (%)	CVRMSE (%)	NMBE(%)	CVRMSE (%)
ASHRAE Guideline 14	5	15	10	30
IPMVP	20	-	5	20

La norme ASTM D5157 reprise dans [ASHRAE \(2009a\)](#) pour la validation de test de pressurisation et de qualité de l'environnement intérieur, propose l'utilisation du coefficient de détermination R^2 dans l'évaluation de la qualité intérieure du bâtiment. Elle préconise un coefficient de corrélation entre mesures et prédictions supérieur à 0,9. La droite de régression entre les prédictions et les mesures doit avoir une pente comprise entre 0,75 et 1,25 et l'ordonnée à l'origine doit être inférieure à 25% de la mesure moyenne.

Dans la section suivante, nous présenterons la démarche adoptée pour la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux prédits.

3.2 Descriptif de l'expérimentation

3.2.1 Le bâtiment expérimental

Les études ont été menées sur un bâtiment résidentiel typique du Burkina Faso située à Ouagadougou. Il s'agit d'un logement F2 de la classe moyenne au Burkina avec un séjour, une chambre, une salle de bains et une cuisine. Ce type de bâtiment est construit dans le cadre du projet national visant à construire 10000 logements sociaux. En effet il s'agit de la construction d'un nouveau quartier sur le site de Bassinko (la périphérie nord de la ville de Ouagadougou au Burkina Faso).

Le choix du bâtiment s'est appuyé sur les résultats des enquêtes présentés au Chapitre 1 dans le but de mener les études sur le cas le plus représentatif. Le bâtiment d'une superficie de 60 m² a une forme en L et possède un auvent au niveau de l'entrée principale de sorte que l'ensemble présente une forme rectangulaire (Figure 3.1). L'entrée principale du bâtiment est orientée 328 °Nord. La Figure 3.2 montre la composition du mur et du plancher. Le mur est construit avec des agglomérés de ciment alvéolés de 15cm et sont recouverts à l'extérieur d'un enduit de ciment d'une épaisseur estimée à 2 cm et une couche minérale de couleur rouge orangée (Figure 3.3). La face interne des parois est recouverte d'un revêtement en enduit de ciment de 2 cm et d'une couche de peinture blanche à base de chaux. Les cloisons

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

ont la même composition que le mur recouvert de peinture blanche sur les deux faces. Le plancher est composé d'une couche de latérite surmontée d'une couche de béton comme chape avec une finition lisse.

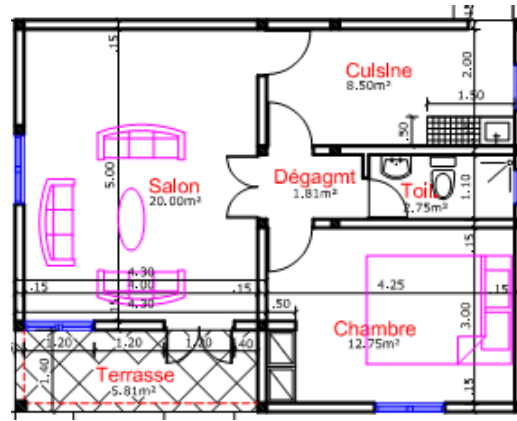


FIGURE 3.1 – Le Plan du bâtiment

Le toit en double pente voutée est en tôle d'acier galvanisé sans comble. L'acier donne directement sur l'air de la zone. La face extérieure est pré-laquée d'une couleur située entre le rouge et l'orange. Les fenêtres sont de dimensions 1.2mx1.2m sans vitrage pour les zones de vie, 0.60mx0.60m pour la salle de bain et de 1mx0.60m pour la cuisine. Des jalousies extérieures permettent de contrôler l'ouverture et la fermeture.

3.2.2 Monitoring du bâtiment

Le bâtiment a été instrumenté avec des capteurs de température et d'humidité. La température et l'humidité relative de l'air ont été enregistrées en deux points de mesure dans la zone. Les températures des surfaces intérieures du bâtiment sont également mesurées. Pour la mesure de la température de l'air, les capteurs sont montés sur un trépied et positionnés à environ 1,10 m au-dessus du sol (hauteur de hanche). La maison a été maintenue fermée (portes et fenêtres) au cours de la période de mesure. Les capteurs sont de type PT100 avec une mémoire permettant le stockage de données. Les températures internes des surfaces opaques sont mesurées par contact avec des capteurs de type "TG" de Waranet³ ayant une précision de 0,36°C. Les capteurs ont été intégrés aux murs au niveau de l'enduit interne des murs. La température et l'humidité de l'air sont mesurées à l'aide des capteurs de type "TH" dont les précisions sont de 0,12°C et entre 2 et 3% respectivement. Le bâtiment n'était pas occupé pendant les campagnes de mesures et il n'y avait aucun

3. [http : // waranet. fr / page_enregistreurs. htm](http://waranet.fr/page_enregistreurs.htm)

3.2. Descriptif de l'expérimentation

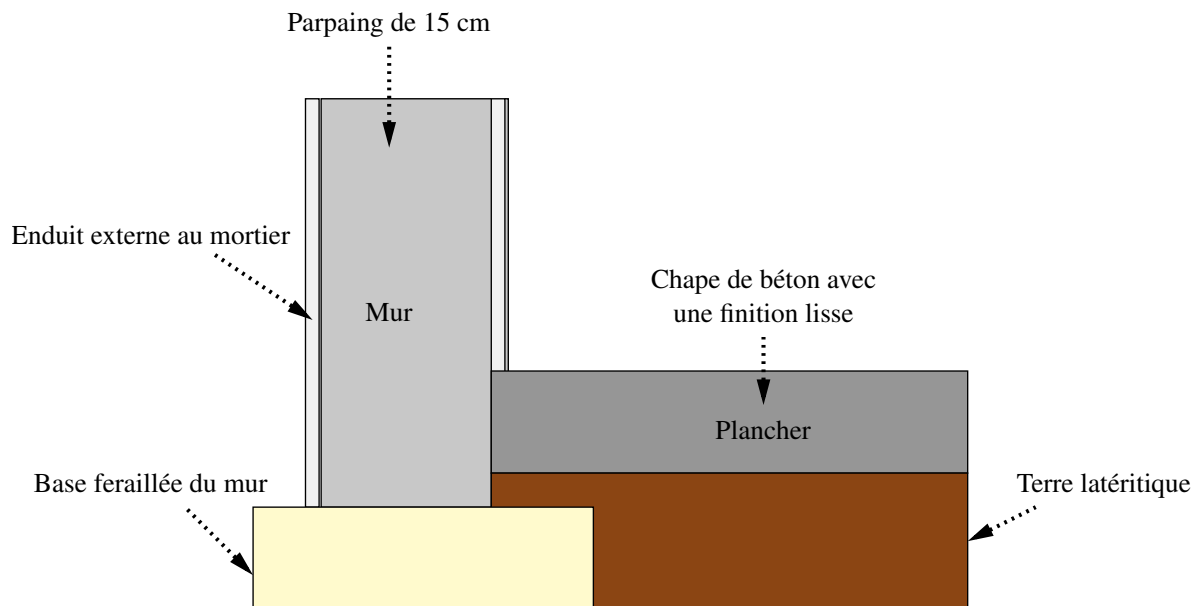


FIGURE 3.2 – La Composition du mur et du plancher



FIGURE 3.3 – La plateforme expérimentale sur le site de Bassinko

équipement électrique ou source de chaleur. Les fenêtres et les portes sont fermées en dehors des périodes de collecte des données.

3.2.3 Sollicitations climatiques

Pour effectuer une simulation en régime dynamique, il est nécessaire d'avoir un fichier météo du lieu concerné avec un pas de temps horaire au minimum. Le pas de temps du fichier utilisé aura un impact sur les résultats de la simulation et doit être cohérent avec le pas de temps de la simulation. La période du fichier peut varier mais si l'étude porte sur la période annuelle, le fichier météo doit contenir un an de données. Les principales données nécessaires pour la simulation sont :

- La température sèche extérieure ($^{\circ}\text{C}$) ;
- La température du point de rosée ($^{\circ}\text{C}$) ;
- L'humidité relative (%)
- La vitesse du vent (m/s) ;
- La direction du vent (degrés) ;
- La pression atmosphérique (Pa) ;
- Le rayonnement global horizontal (W/m^2) ;
- Le rayonnement direct normal (W/m^2) ;
- Le rayonnement diffus horizontal (W/m^2).

Dans le cadre d'une comparaison avec des mesures expérimentales, la création du fichier météorologique est une étape clé du processus pour maîtriser au mieux les incertitudes qui lui sont liées. Les données météorologiques locales sont obtenues à partir d'une station météorologique automatique sur le site de l'Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). La Figure 3.4 montre la température, l'humidité et les ensoleillements pendant la période du 14/02 au 23/02/2014. Ces données météo ont été formatées pour servir de données d'entrée au programme de simulation du modèle détaillé du bâtiment.

3.3 Simulation du comportement thermique du bâtiment

3.3.1 Les hypothèses de modélisation

Les modèles sont des approximations mathématiques tentant de reproduire la réalité. Un modèle du bâtiment a été réalisé dans EnergyPlus. Le bâtiment expérimental est en évolution libre c'est-à-dire sans système énergétique. Il n'y a pas d'apport internes dans la zone. Par conséquent, les principales hypothèses concernent l'enveloppe du bâtiment, l'aéraulique, et le modèle numérique de résolution.

3.3.1.1 L'enveloppe du bâtiment

Les dimensions du bâtiment ainsi que les formes géométriques ont été modélisées grâce à OpenStudio et google sketchup qui permettent une modélisation en

3.3. Simulation du comportement thermique du bâtiment

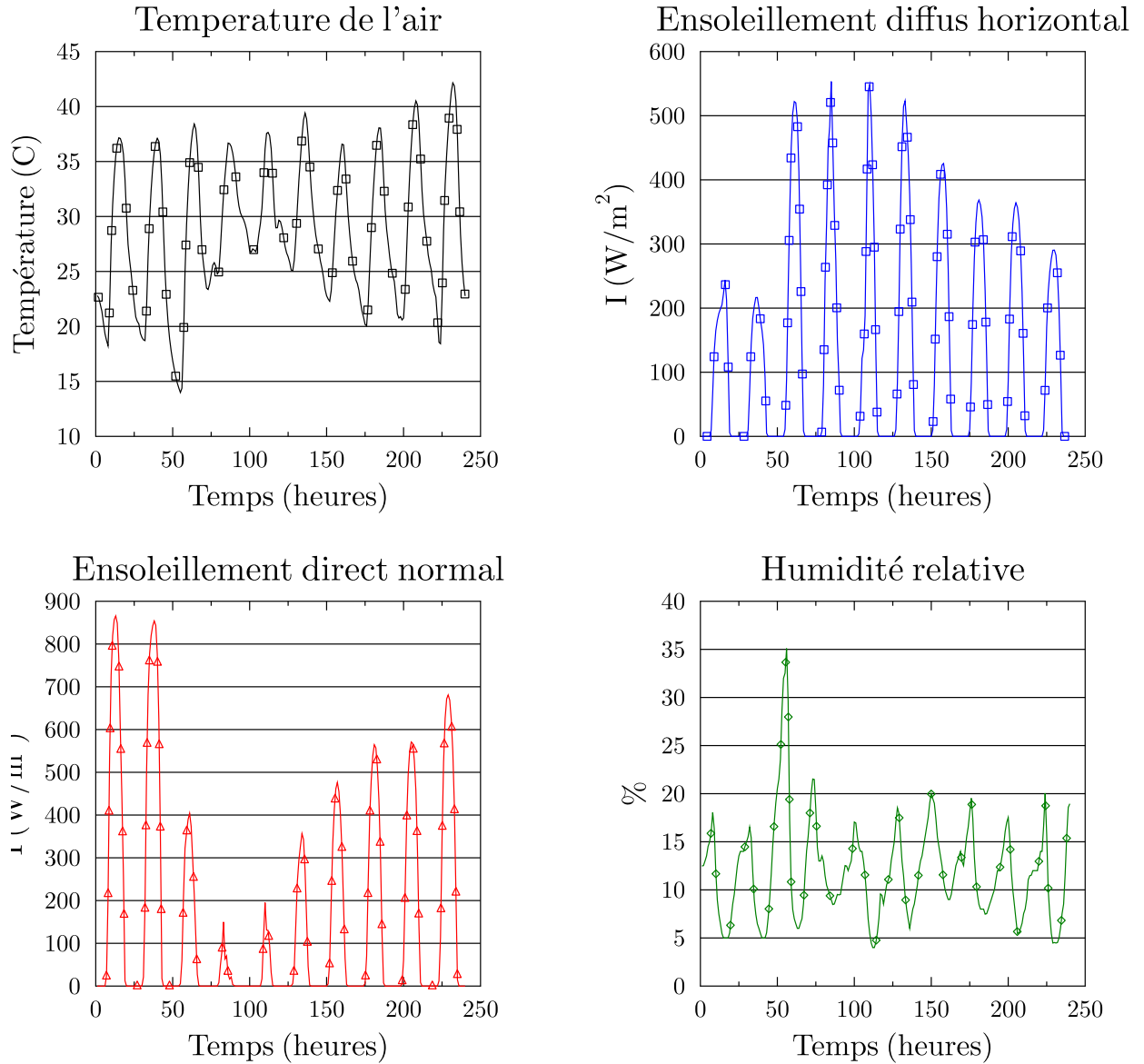


FIGURE 3.4 – La température de l'air, les ensoleillements, et l'humidité relative du 14 au 23 février 2014

3D. Il s'agit des différentes parois (Les murs, le plancher, et la toiture et les ouvertures) et de l'auvent (Figure 3.5). Pendant la mesure, les ouvertures entre les pièces étaient toujours ouvertes, et l'hypothèse d'une zone est pertinente étant donné que

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

les différentes pièces partagent le même air. Ce modèle nodal à une zone prend en compte les partitions à l'intérieur de la zone et sont modélisées comme des masses internes. Le modèle monozone considère le bâtiment dans son ensemble comme une enceinte dont les caractéristiques internes sont parfaitement uniformes. En outre, l'enveloppe du bâtiment est décrite de façon détaillée afin de représenter les déperditions via les composants en façade. La jalousie a été modélisée comme une protection solaire et un vitrage virtuel de manière à limiter les apports solaires dans la zone et surtout éviter les divergences dans les simulations du programme. En effet le programme n'est pas adapté pour une fenêtre sans vitrage. Ce modèle est renseigné par les propriétés thermo-physiques et les propriétés de surface (Tableau 3.3 et 3.2) qui proviennent de la littérature Reagan and Acklam (1979) Kültür and Tülrkeri (2012). L'albédo du sol environnant est fixé à 0,2, provient d'une étude sur les propriétés des sols menée par OFFERLE et al. (2005).



FIGURE 3.5 – Rendu géométrique du modèle EnergyPlus

TABLE 3.2 – Propriétés thermo-physique des matériaux

Matériaux	Conductivité(W/mK)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Masse volumique (Kg/m3)
Parpaing de ciment 2 rangées alvéolées	0,833	1000	1000
Tôle acier galvanisé	50	450	7800
Mortier-enduit	1,150	1000	1700
Béton	1,4	1001	2200

3.3. Simulation du comportement thermique du bâtiment

TABLE 3.3 – Propriétés de surface des matériaux

	émissivité infrarouge	absorptivité solaire
enduit extérieur	0,9	0,6
Toit laqué rouge	0,8	0,6
Acier galvanisé	0,2	0,6
Enduit intérieur blanc	0,9	0,2

3.3.1.2 La ventilation et l'infiltration

Dans la littérature, on peut noter un manque de travaux sur la ventilation naturelle dans les bâtiments en climat tropical chaud et particulièrement en Afrique sub-saharienne. Ce constat explique notre choix de minimiser les échanges d'air avec l'extérieur dans le bâtiment par la fermeture des grandes ouvertures tout au long de l'expérimentation. Cependant, il subsiste des défauts de fermetures par lesquels il peut y avoir des fuites ou de la ventilation. Il existe des bouches d'aération sous toiture au nombre de 8 au niveau des deux façades opposées (Nord au Sud). Ces ouvertures ont un diamètre de 10 cm. Le bâtiment est soumis à la ventilation et à l'infiltration, régis par le vent et les différences de température d'air entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment. Plusieurs méthodes (empirique, zonal, nodal et la CFD) permettent de prédire les débits d'air à travers les ouvertures d'un bâtiment. Parmi les formules empiriques, on distingue celles qui se basent sur des données de test de pressurisation (la différence de pression normalisés, la surface effective des ouvertures) des autres méthodes comme la British standard et la méthode de l'ASHRAE. La méthode proposée par l'ASHRAE sera utilisée compte tenu du manque de données de test de pressurisation sur le type de bâtiment étudié. La surface équivalente A est évaluée suivant les règles énoncées par (Awbi, 1994) concernant les ouvertures multiples en parallèles et en série. C_w est un coefficient adimensionnel qui caractérise l'ouverture et est calculé par le code en fonction de la direction du vent. La hauteur de pression neutre H_{NPL} caractérise la position l'axe neutre où les pressions induites par le vent sur l'enveloppe sont nulles. Elle permet de prendre en compte le phénomène des débits dans les deux sens pour les grandes ouvertures. Selon l'ASHRAE (2009a) pour les bâtiments en rez-de-chaussée le H_{NPL} se situe à mi-hauteur au niveau de la plus grande ouverture. C_d qui caractérise la perte de charge au niveau de l'ouverture est évalué par le programme en utilisant l'approche de Kiel et Wilson ASHRAE (2009a).

$$Q_w = C_w \cdot A \cdot V \quad (3.4)$$

Q_w : le débit de ventilation dû au vent ; C_w : le coefficient caractérisant l'ouverture ; V : la vitesse moyenne du vent référence (Annexe) ; A : la surface équivalente estimée.

$$Q_{(stack)} = C_d A \sqrt{2g H_{NPL} \frac{(T_{int} - T_{ext})}{\max(T_{int}, T_{ext})}} \quad (3.5)$$

Q_{stack} : le débit de ventilation dû à la différence de température ; C_d : le Coefficient de décharge ; V : la vitesse moyenne du vent référence (ANNEXE 3) ; A : la masse volumique de l'air ; H_{NPL} la hauteur de pression neutre.

3.3.1.3 Modèle numérique et initialisation

La méthode des fonctions de transfert "CTFs"⁴ (ANNEXE 1) a été utilisée pour la résolution des équations de transfert de chaleur dans les parois et au niveau de la toiture.

Concernant les échanges convectifs, il y a plusieurs choix pour la modélisation des coefficients de convection dans EnergyPlus [EnergyPlus \(2013\)](#) qui propose plusieurs corrélations pour les surfaces intérieures et les extérieures. Nous avons considéré la corrélation TARP (Thermal Analysis Research Program) proposée par l'ASHRAE pour les surfaces intérieures et extérieures (ANNEXE 1). L'initialisation du programme consiste en 50 itérations du premier jour de simulation avec un pas de temps de 3mn.

3.3.2 Confrontation entre simulation et expérimentation

La comparaison est focalisée sur la température de l'air et les températures de surface des mur Sud, Est et du toit. La validation de ces paramètres devrait permettre ensuite le diagnostic du comportement thermique du bâtiment.

La Figure 3.6 compare les prédictions du modèle avec les mesures des températures moyennes de l'air et de la face interne du toit. On peut observer que mesures et simulations se comportent de façon analogue tant pour l'air que pour le toit. L'écart maximal pour la température de l'air dans la zone est de 6°C. Ces écarts surviennent pendant les périodes de surchauffe diurnes et de refroidissement nocturnes.

En examinant les températures de la toiture on peut observer une différence très importante entre mesures et simulations pendant les périodes de surchauffe avec un écart maximal de 20°C. Les températures des murs Sud et Est sont présentées dans la Figure 3.7. On observe des écarts limités entre expérimentation et simulation avec un écart maximal de 4,5°C. Pendant la période de mesure le mur Sud est la paroi la plus exposée au rayonnement solaire. On observe que ses températures sont légèrement plus élevées que celles du mur Est. Concernant le mur Est, des écarts au niveau des pics et des creux sont aussi observés avec un résidu maximal de 5°C. Pour les deux cas on observe un léger déphasage entre simulations et mesures.

4. Conduction Transfer Function

3.3. Simulation du comportement thermique du bâtiment

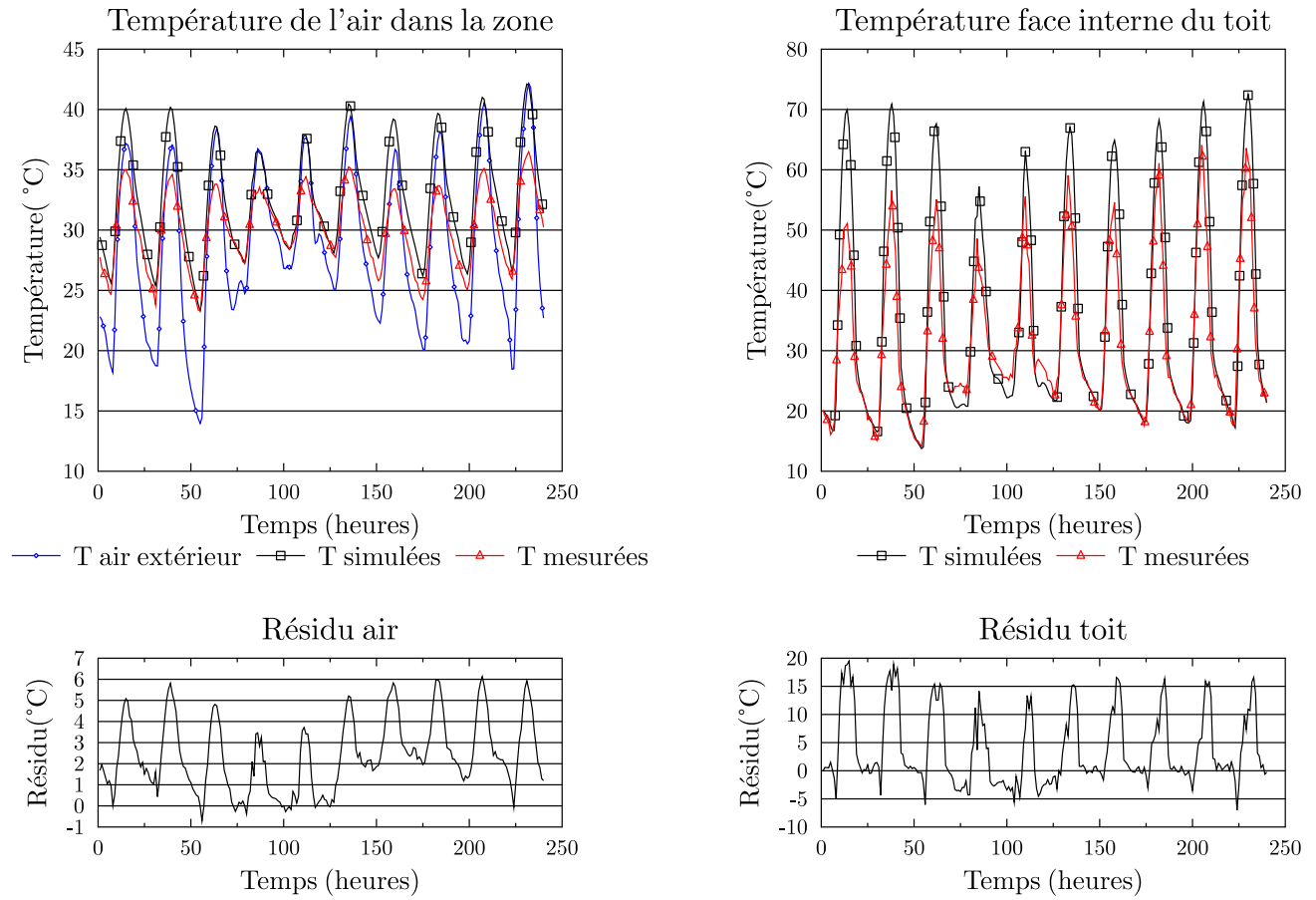


FIGURE 3.6 – Les températures mesurées et simulées de l'air de la zone et de la toiture

TABLE 3.4 – Évaluation des critères de calibration du modèle de référence

	Air	Mur Sud	Mur Est	Toit
R^2	0,914	0,886	0,884	0,918
CV(RMSE)	0,098	0,072	0,089	0,245
NMBE	0,079	0,053	0,075	0,119

Les corrélations entre les deux séries de données sont illustrées dans la Figure 3.8 et le Tableau 3.4. Les coefficients de détermination de 0,914, 0,88, 0,88 et 0,918 sont obtenus respectivement pour les températures de l'air, du mur Sud, du mur Est et de la toiture. On peut noter que les pentes des droites de régression ne sont pas

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

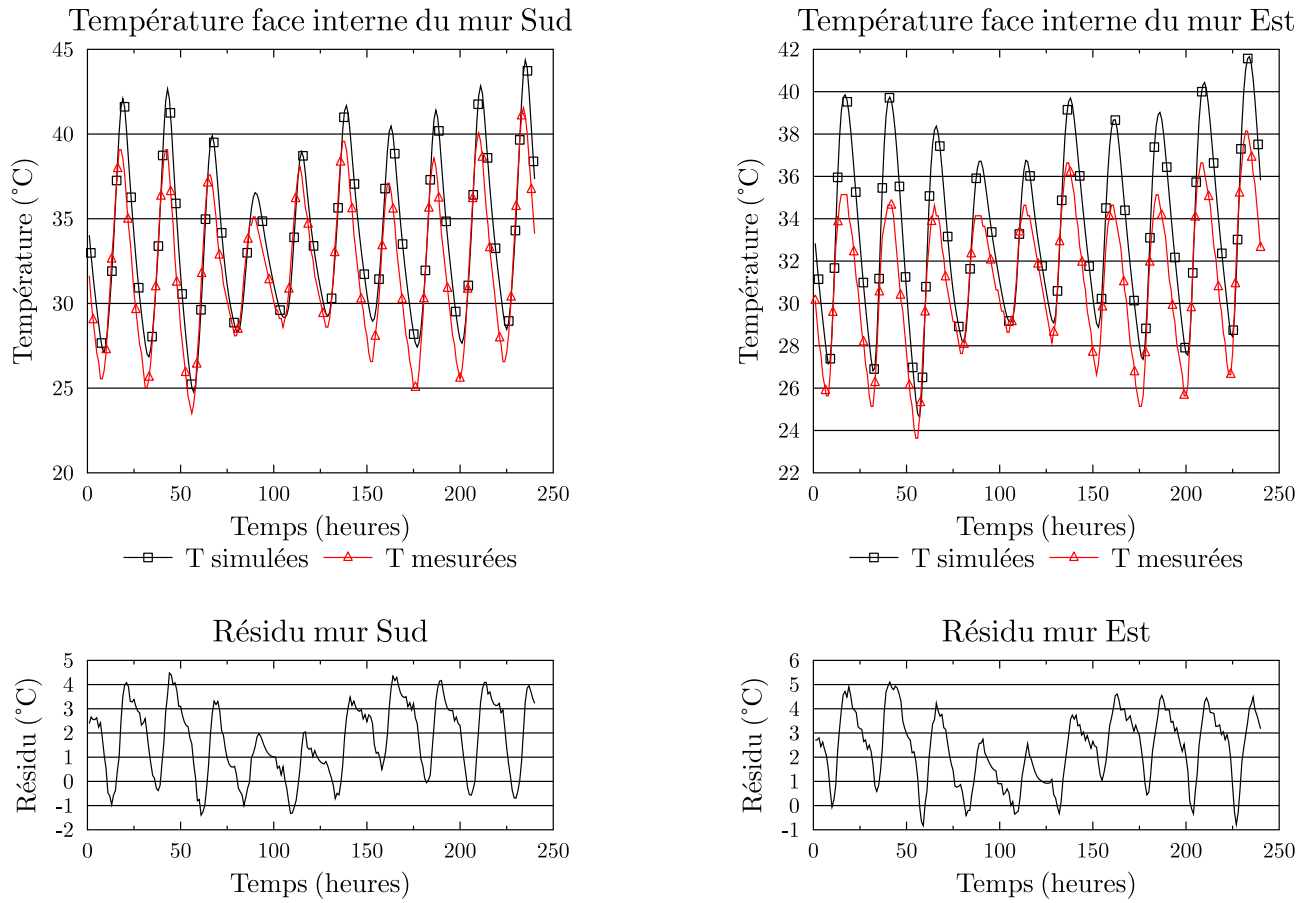


FIGURE 3.7 – Les températures mesurées et simulées des parois Sud et Est

dans l'intervalle recommandé pour les paramètres qui ont des coefficients supérieurs à 0,9 (l'air dans la zone et la toiture). Sur le Tableau 3.4 on constate que les NMBE et CVRMSE satisfont aux critères horaires de l'ASHRAE Guideline pour la température de la zone, et les températures des parois verticales. Pour la température de la toiture, ces valeurs excèdent les limites. Par ailleurs, ces critères sont hors des recommandations de IPMVP (Tableau 3.1) qui préconise 5% et 10% respectivement pour le NMBE et le CVRMSE. Après évaluation des trois critères nous considérons que ce modèle n'est pas valide. L'étape suivante consistera à appliquer une méthode de calibration au modèle.

3.4. Calibration du modèle détaillé du bâtiment

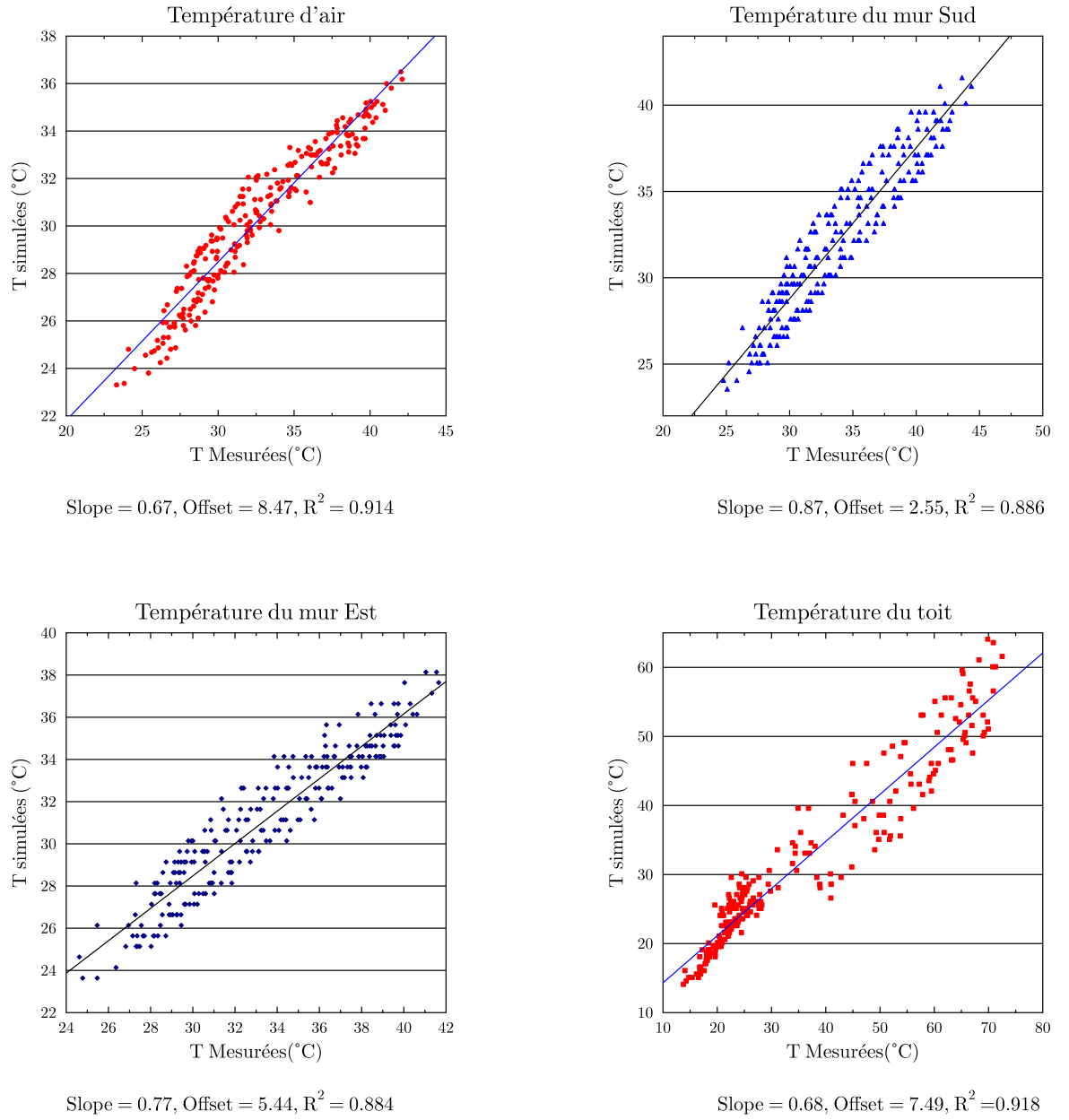


FIGURE 3.8 – Coefficient de détermination entre mesures et simulations

3.4 Calibration du modèle détaillé du bâtiment

Après observation des critères de validité dans la section précédente, des solutions pour améliorer le modèle sont alors recherchées. Nous cherchons ici à calibrer

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

les températures des éléments comparés afin qu'ils puissent mieux représenter la réalité. Comme spécifié dans les sections précédentes, les biais entre mesures et simulations proviennent de plusieurs sources. La validation empirique qui permet de calibrer le modèle avec des données expérimentales est la mieux indiquée pour ce genre de situation.

Étant donné que les outils de simulation détaillés utilisent un grand nombre de paramètres, nous avons adopté une approche qui consiste à déterminer l'influence de ces paramètres sur le bâtiment à travers une analyse de sensibilité paramétrique. L'objectif de l'analyse de sensibilité est de pouvoir repérer parmi les nombreux paramètres du modèle numérique, ceux qui ont le plus d'influence sur le comportement du modèle afin de mieux comprendre d'où peuvent provenir les écarts entre le modèle numérique et les mesures expérimentales.

3.4.1 Analyse de sensibilité

3.4.1.1 Identification des paramètres et description de la méthodologie

Le nombre et la complexité des liens reliant les différents paramètres d'entrée d'une simulation aux résultats en sortie rendent difficile l'expression de ces interactions de manière analytique. L'analyse de sensibilité permet donc de quantifier l'influence de la variation des paramètres en entrée sur les résultats en sortie. Elle constitue une étape primordiale qui permet d'orienter la recherche des valeurs des paramètres de simulation incertains.

L'approche adoptée pour l'étude de sensibilité est la suivante :

- Formulation du cas de référence ;
- Identification des paramètres d'intérêt (entrée et sortie) ;
- Perturbation au niveau des paramètres d'entrée ;
- Étude des effets de ces perturbations sur les résultats en sortie ;
- Calcul des coefficients de sensibilité.

Les paramètres entrant dans le modèle numérique sont nombreux, il est donc nécessaire de choisir ceux qui semblent les plus pertinents à étudier. L'outil de simulation que nous utilisons est un code validé [Crawley et al. \(2001\)](#). Par conséquent les biais de types algorithmique et numérique ne seront pas pris en compte dans cette étude. Les incertitudes liées à l'exploitation du bâtiment sont négligeables car il était inoccupé pendant la période de test et pas soumis à l'effet d'un système énergétique. En effet l'enveloppe du bâtiment est classique et utilise des matériaux conventionnels dont les propriétés sont relativement connues. Plusieurs facteurs font qu'il y a des incertitudes sur les propriétés des matériaux : l'uniformité des granulats utilisés, la confection réalisée sur place et le travail manuel. A cela on peut ajouter les propriétés de surface des matériaux, les paramètres utilisés pour l'estimation des débits d'infiltration et de ventilation dans le bâtiment.

3.4. Calibration du modèle détaillé du bâtiment

Dix-neuf paramètres ont été identifiés pour cette étude paramétrique. Concernant l'enveloppe du bâtiment, il s'agit :

- De la conductivité λ , la masse volumique ρ et la chaleur spécifique C des différentes couches composant le mur et la toiture référencés par : Ee (enduit extérieur), ag (aggloméré de ciment), Ei (enduit intérieur), et T (toiture) ;
- Des propriétés optiques que sont l'émissivité ε et l'absorptivité solaire α pour les parois interne et externe de la maçonnerie et de la toiture : Mi, Me (surface interne et externe des murs) et Ti, Te (toiture) ;
- concernant la ventilation il s'agit de la hauteur de pression neutre H_{NPL} .

Nous proposons ici d'évaluer la calibration à travers l'utilisation simultanée de ces trois critères de validation. Le paramètre observé est la fonction F_c .

$$F_{cR} = \frac{1 - R_{air}^2}{1 - R_{air-ini}^2} + \frac{1 - R_{toit}^2}{1 - R_{toit-ini}^2} + \frac{1 - R_{Msud}^2}{1 - R_{Msud-ini}^2} + \frac{1 - R_{Mest}^2}{1 - R_{Mest-ini}^2} \quad (3.6)$$

$$F_{cCV} = \frac{CV(RMSE)_{air}}{CV(RMSE)_{air-ini}} + \frac{CV(RMSE)_{toit}}{CV(RMSE)_{toit-ini}} + \frac{CV(RMSE)_{sud}}{CV(RMSE)_{sud-ini}} + \frac{CV(RMSE)_{est}}{CV(RMSE)_{est-ini}} \quad (3.7)$$

$$F_c = F_{cR} + F_{cCV} \quad (3.8)$$

R^2 et $CV(RMSE)$ représentent respectivement le coefficient de détermination et coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne pour le paramètre étudié. Cette fonction est évaluée automatiquement grâce à EnergyPlus et Genopt. En effet, EnergyPlus dispose d'un langage de programmation qui permet à l'utilisateur d'intervenir pendant les étapes de la simulation. Il s'agit de l'EnergyPlus Runtime language (ERL), sous lequel un code permettant d'évaluer la fonction F_c a été écrit et intégré au programme de simulation. Le code compare à chaque pas de temps la mesure et la prédiction, et stocke le résidu. A la fin de la simulation les données sont envoyées à GenOpt qui à son tour évalue les indices et la fonction objectif.

L'analyse de sensibilité consiste ensuite à effectuer une perturbation de chaque paramètre de plus ou moins 10% et d'en observer l'effet sur les paramètres de sortie. Le facteur de sensibilité S_p est calculé par la formule suivante :

$$S_p = \frac{\frac{\delta F_{ci}}{F_{c-ini}}}{\frac{\delta P_i}{P_i}} \quad (3.9)$$

Où δP_i représente la variation du paramètre P_i et δF_{ci} la variation de la fonction. On évalue ainsi la fonction objectif calibration à chaque perturbation des paramètres identifiés.

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

3.4.1.2 Résultats de l'analyse de sensibilité

Nous avons mené cette étude sur les propriétés thermo-physiques des matériaux de construction, leurs propriétés optiques et sur la ventilation.

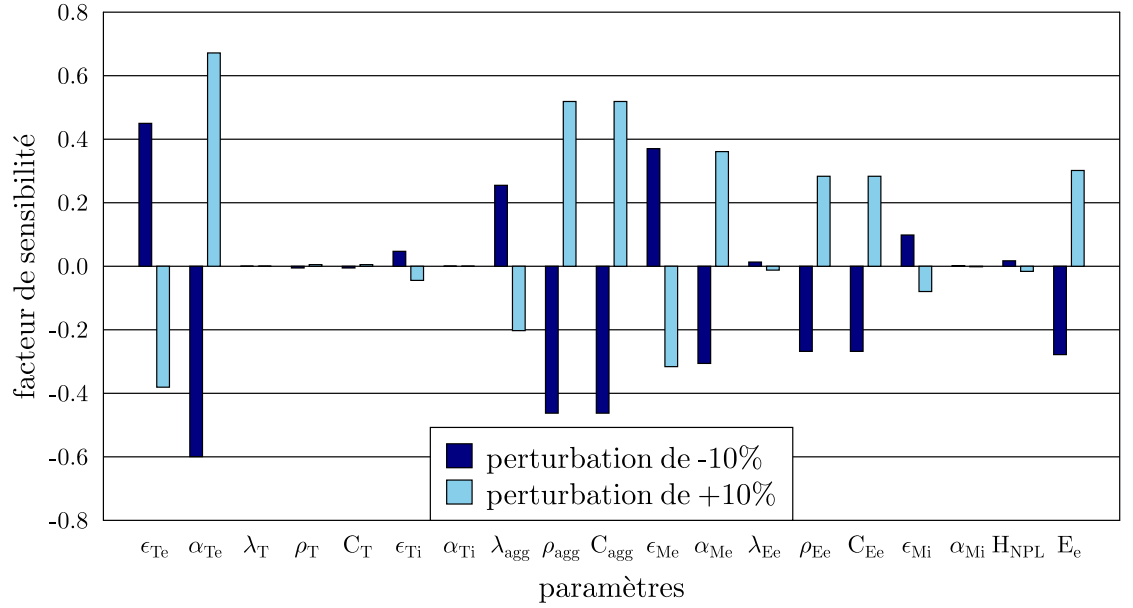


FIGURE 3.9 – Influence (indice de sensibilité) des paramètres d'entrée sur la fonction objectif de calibration

On peut observer les impacts des propriétés des matériaux sur la fonction calibration F_c . La conductivité et la chaleur spécifique ont des facteurs de sensibilité élevés. En effet les propriétés de l'aggloméré de ciment sont relativement bien connues mais, la grande variabilité des granulats utilisés peut rendre ce paramètre incertain. La toiture étant une surface horizontale, elle est soumise à d'importants échanges thermiques avec l'environnement, et le soleil en particulier. Par conséquent et en prenant en compte la faible épaisseur du métal on peut expliquer la faiblesse du facteur de sensibilité due aux propriétés thermo-physiques du matériau qui est l'acier galvanisé.

De façon générale, pour les surfaces extérieures, la modification de l'émissivité et de l'absorptivité impacte sur la fonction calibration. Il s'agit du cas de la toiture ($\epsilon_{Te}, \alpha_{Te}$) et à moindre mesure de l'enduit extérieur ($\epsilon_{Me}, \alpha_{Me}$). Ces surfaces sont soumises à d'importants échanges thermiques par radiation dans le contexte climatique en question. Concernant les surfaces ayant l'air de la zone comme condition

3.4. Calibration du modèle détaillé du bâtiment

aux limites, l'absorptivité solaire (α_{Mi} , α_{Ti}) a très peu d'influence. Cela est dû au fait que les jalousies sont fermées et qu'il n'y a pas de sources de radiation dans les longueurs d'ondes concernées. La variation de l'émissivité (ε_{Mi} , α_{Ti}) a un impact sur la fonction évaluée. Concernant les paramètres de la ventilation, on observe très peu d'impact. Cependant ce paramètre est très incertain car la formule empirique que nous utilisons pour l'estimer est une approximation.

3.4.2 Optimisation des paramètres du modèle

3.4.2.1 Description

Après avoir isolé les paramètres les plus influents sur la fonction coût, nous allons maintenant procéder à une optimisation de l'erreur entre mesures et simulations. Pour cela les paramètres du modèle de référence sont optimisés sur des plages de validité (Table 3.5).

Concernant les propriétés thermo-physiques (conductivité, masse volumique et chaleur spécifique) plusieurs travaux font cas des incertitudes liées à l'estimation de ces paramètres en fonction des types de matériaux [Macdonald and Strachan \(2001\)](#); [Clarke and Yaneske \(2009\)](#). Le plus simple à déterminer entre les trois propriétés thermo-physiques, est la masse volumique. Cependant, la teneur en eau peut avoir un effet significatif sur ce paramètre et il n'existe pas de méthode de détermination standard. Nous adopterons l'incertitude liée à la masse volumique proposée par [Macdonald and Strachan \(2001\)](#) d'environ 5% pour les matériaux inorganiques poreux comme les agglomérés de ciment et le mortier de ciment. Concernant la conductivité [Macdonald and Strachan \(2001\)](#) et [Clarke and Yaneske \(2009\)](#) soulignent que l'humidité et la température peuvent rendre ce paramètre incertain dans une plage de 5% à 15% en fonction du matériau. Une plage de variation de 10% sera envisagée dans le cadre de notre étude. [Macdonald and Strachan \(2001\)](#) indique que l'incertitude dans l'estimation de la chaleur spécifique est bien plus élevée que celle de la conductivité thermique.

Plusieurs travaux sont menés sur l'estimation des propriétés de surfaces [Levinson et al. \(2007\)](#); [Levinson, Berdahl, and Akbari \(2005\)](#); [Reagan and Acklam \(1979\)](#); [Levinson, Akbari, and Berdahl \(2010\)](#); [Akbari, Levinson, and Stern \(2008\)](#). En effet les propriétés optiques de surface des matériaux sont mesurées en laboratoire mais, elles sont susceptibles de varier au cours de leur utilisation [Macdonald and Strachan \(2001\)](#). L'exposition aux intempéries a tendance à diminuer le facteur de réflexion des matériaux non transparent et augmenter ainsi l'absorptivité, ces variations pouvant atteindre les 30% relève [Prado and Ferreira \(2005\)](#). Le Tableau 3.5 présente les plages d'incertitudes adoptées pour cette étude. Afin de mener les optimisations, l'algorithme de recherche hybride "GPSPSOCCHJ" est appliqué à travers Genopt. On cherche à minimiser la fonction F_c , et cela revient à trouver les

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

valeurs maximales pour les coefficients de détermination et les valeurs minimales des coefficients de variation CVRMSE.

3.4.2.2 Résultat de l'optimisation des paramètres

La période de calibration s'étend du 14 /02 au 23/02 2014. Après optimisation, la fonction F_c passe de 0,902 à 0,556. Le Tableau 3.5 présente les paramètres optimisés et l'intervalle dans lequel la recherche a été réalisée. Concernant les paramètres de la toiture, une émissivité infrarouge de 0,85 a été trouvée pour la face extérieure et 0,27 pour la face interne. Ces valeurs d'émissivité cadrent bien avec les données utilisées par des auteurs comme Kültürlü and Türlkeri (2012) pour le même pigment que notre cas d'étude. Pour l'absorptivité solaire, la valeur 0,45 trouvée est dans la plage des données utilisées dans la littérature concernant le laquage rouge sur le métal. En effet Prado and Ferreira (2005) fait cas d'une absorptivité moyenne de 0,376 pour l'acier prélaqué rouge et 0,456 pour l'aluminium. La base de données Basix⁵ en Australie place la gamme de couleur rouge dans la classe des couleurs médium où l'absorptivité varie entre 0,4 et 0,7.

TABLE 3.5 – Plage d'incertitude et valeurs des paramètres trouvées après optimisation des paramètres les plus influents du modèle

	Limite inf	Limite sup	Valeur initiale	Valeur optimisée
ε_{Te}	0,8	0,95	0,8	0,85
α_{Te}	0,4	0,75	0,6	0,45
ε_{Ti}	0,05	0,3	0,2	0,27
ε_{Me}	0,8	0,95	0,9	0,95
α_{Me}	0,4	0,75	0,6	0,47
ε_{Mi}	0,8	0,95	0,9	0,95
λ_{agg}	0,7497	0,9163	0,833	0,867
ρ_{agg}	900	1100	1000	900
C_{agg}	900	1100	1000	900
λ_{E-i}	1.035	1,265	1,15	1,189
ρ_{E-i}	1530	1870	1700	1590
C_{E-i}	900	1100	1000	900
$\delta Hnpl$	0,1	1,5	1	0,1
e_E	0,015	0,022	0,02	0,015

Les propriétés de surface de la paroi verticale sont respectivement de 0,95 pour l'émissivité infrarouge et 0.47 pour l'absorptivité solaire à l'extérieur. Pour la face interne, l'absorptivité étant peu influente, l'émissivité était retenue. Concernant

5. <http://www.solacoat.com.au/Solacoat-Colours-pg22999.html>

3.4. Calibration du modèle détaillé du bâtiment

les agglomérés de ciment, une valeur optimale est trouvée pour la conductivité. Cependant pour la masse volumique et la chaleur spécifique, on obtient les bornes inférieures de l'intervalle de variation. Des valeurs de 0,87 W/mK et 1,189 W/mK sont trouvées pour la conductivité thermique, respectivement pour l'aggloméré et le mortier servant d'enduit. L'enduit étant posé manuellement, il y a pas d'uniformité et la borne inférieure de 1.5 cm est recommandée par l'algorithme de recherche. L'optimisation tend à réduire l'infiltration dans le bâtiment. Une simulation sans ventilation donne de meilleurs résultats mais ne reflète pas la réalité.

Les Figures 3.10 et 3.11 présentent les prédictions du modèle après optimisation. Le résidu maximal concernant la température de l'air est de 2,5°C contre 6°C pour le cas de référence. Pour les températures de face interne de la toiture métallique l'écart chute de 20°C à 8°C (Figure 3.10). Concernant les parois verticales, on a le même constat d'une diminution des résidus (Figure 3.11).

TABLE 3.6 – Les critères de validation après optimisation

	Air	Mur Sud	Mur Est	Toit
R_{air}^2	0,919	0,952	0,934	0,904
CV(RMSE)	0,049	0,042	0,043	0,135
NMBE	0,008	-0,021	0,001	-0,007

Concernant les critères de validation, le Tableau 3.6 présente les résultats de l'optimisation. En comparant les Tableaux 3.4 et 3.6 on peut observer une amélioration des différents critères en général et en particulier pour les murs. Si les coefficients de détermination de l'air et de la toiture ont très peu varié, on peut relever que le NMBE et le CVRMSE ont subi des variations importantes. Il s'agit aussi du cas des pentes des droites de régression (Figure 3.12). Les critères de l'ASHRAE Guideline et de l'IPMVP sont ainsi respectés.

3.4.2.3 Validation

Pour tester la validité du modèle, des investigations ont été menées sur d'autres périodes de l'année. Le modèle calibré est utilisé sur la période 24/02 au 9/03 dans le but d'observer le comportement hors de la période de calibration. Cette période, notamment les jours du mois de mars correspond au début de la période caniculaire dans la région du sahel.

La Figure 3.13 montre la température de l'air dans la zone et celle de la toiture pour la période allant du 24/02 au 9/03. On peut observer que prédictions et mesures ont les mêmes tendances avec des écarts au niveau des pics et des creux. Les résidus restent en majorité dans l'intervalle entre +/-2°C. Une diminution du résidu concernant les mesures de la toiture est observée.

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

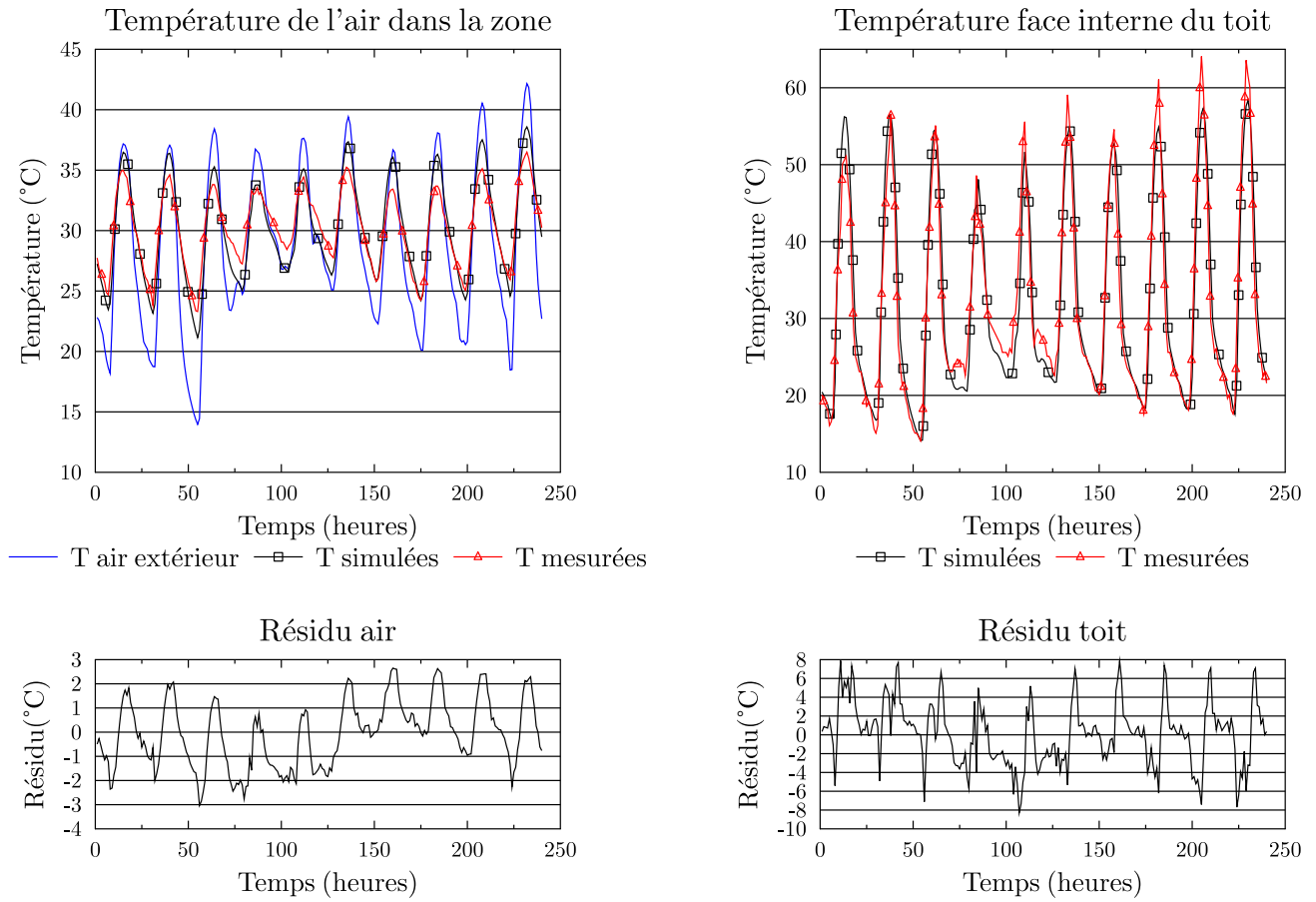


FIGURE 3.10 – Température mesurées et simulées après optimisation pour l'air de la zone et la toiture

En effet, les grands écarts surviennent pendant les jours situés entre 100 et 150h. Ces jours correspondent à des jours pluvieux. Les écarts peuvent être expliqués dans ce cas par le manque de données sur le taux de couverture du ciel. De façon générale on peut noter un bon comportement du modèle hors de la période de calibration.

3.5 Application du modèle calibré à l'étude des transferts thermiques dans le bâtiment

Le modèle calibré est utilisé pour évaluer les contributions de chaque composant du bâtiment dans les échanges thermiques en cours. Ces échanges thermiques sont évalués du 2/03 au 4/03/2014. Il s'agit de la conduction dans les parois verticales

3.5. Application du modèle calibré à l'étude des transferts thermiques dans le bâtiment

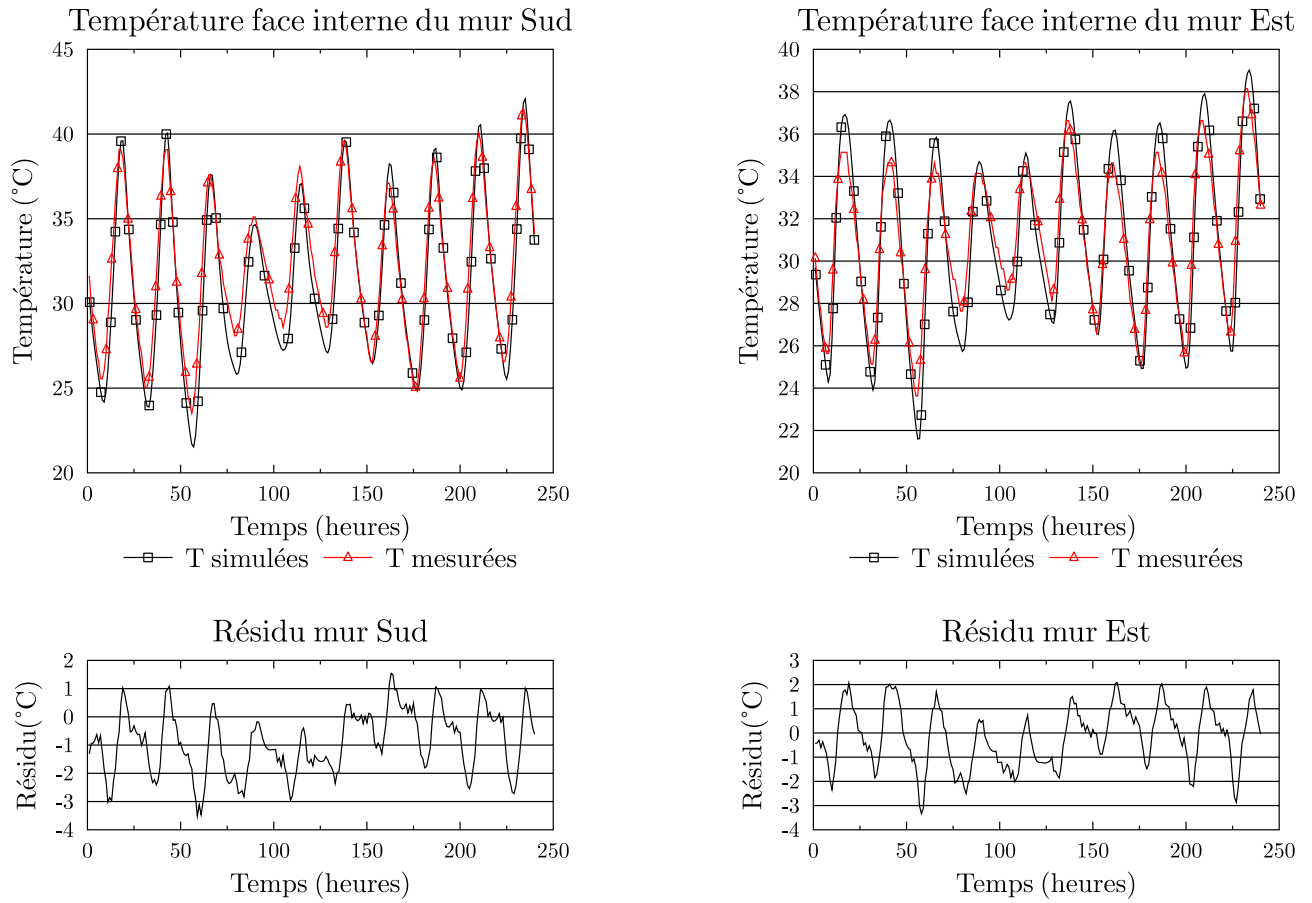


FIGURE 3.11 – Les températures mesurées et simulées après optimisation pour l'air de la zone et la toiture

et la toiture, le rayonnement et la convection des surfaces de l'enveloppe donnant sur la zone et des apports de chaleur dus aux débits d'infiltration estimés.

Concernant les transferts de chaleur par conduction, la méthode "CTF" est utilisée pour résoudre l'équation de la chaleur au niveau des murs et du toit. La Figure 3.15 présente les résultats. Pour interpréter le graphe sur la conduction, il faut rappeler que la valeur positive indique que le sens de la conduction thermique est du cœur du matériau vers sa surface interface avec l'air de la zone. Au niveau des parois verticales, pendant les heures diurnes la conduction de chaleur se déroule dans le sens négatif. La conduction se fait de la surface vers le cœur du matériau, indiquant que le matériau de la paroi interne stocke la chaleur. Aux heures nocturnes le sens de la conduction est inversé, indiquant une restitution de la chaleur à la zone. Le sens du phénomène de conduction est inversé pour le toit et les puissances surfaciques

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

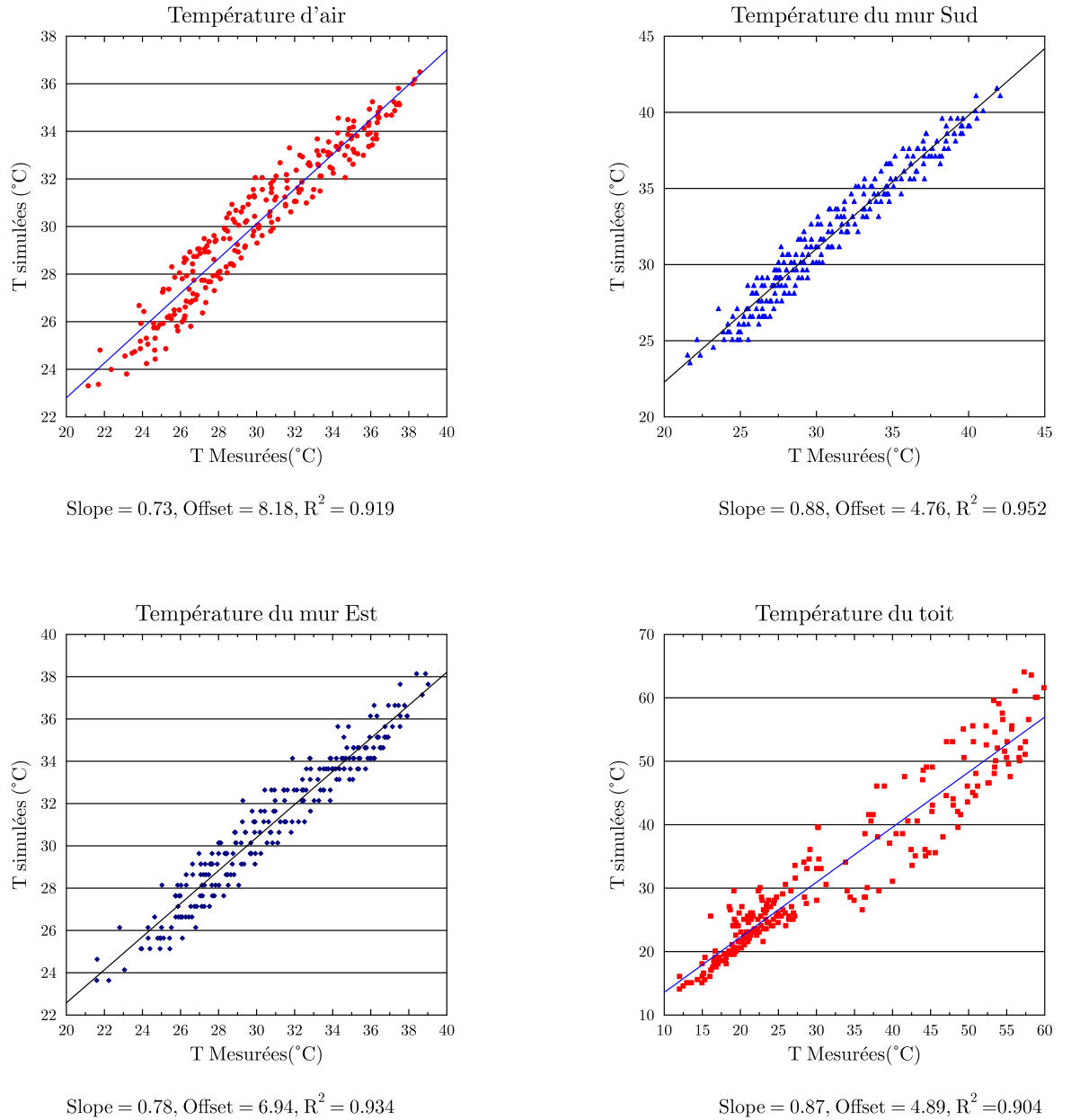


FIGURE 3.12 – Les températures mesures et simulation après optimisation parois Sud et Est

sont très élevées en comparant avec celles des parois verticales pendant les heures diurnes et nocturnes. En ce qui concerne les transferts de chaleur par convection avec l'air de la zone (Figure 3.15), le signe négatif indique une perte de chaleur par

3.5. Application du modèle calibré à l'étude des transferts thermiques dans le bâtiment

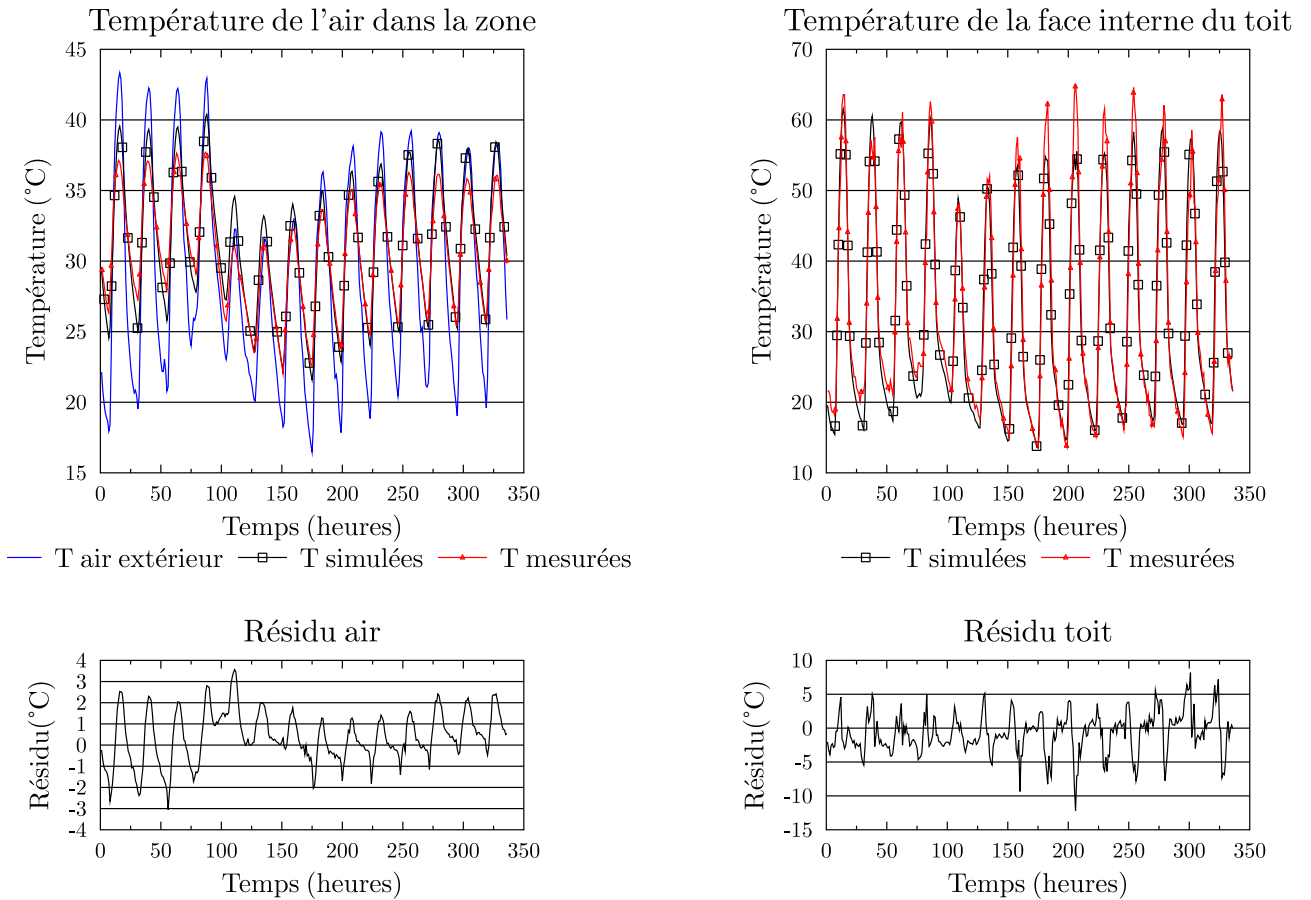


FIGURE 3.13 – Les températures mesurées et simulées hors de la période de calibration air et toit

la paroi. La corrélation TARP [EnergyPlus \(2013\)](#) a été utilisée pour déterminer le coefficient de convection utilisé dans le modèle. L'air dans la zone échange par convection avec les parois verticales et horizontales. Les parois verticales perdent de la chaleur par convection avec l'air de la zone pendant la nuit et en emmagasinent en journée. Au niveau de la toiture les échanges sont très élevés et le phénomène est inversé.

Pour modéliser le phénomène de rayonnement la température du ciel (ANNEXE 1) est calculée afin de prendre en compte les échanges radiatifs entre l'enveloppe du bâtiment et le ciel. On peut observer sur la Figure 3.16, le rayonnement des parois entre elles. Comme pour la convection le signe négatif indique une perte de chaleur par la paroi. Ainsi, compte tenu de la température élevée de la toiture, celle-ci rayonne sur les parois internes de la zone principalement durant les heures d'enso-

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

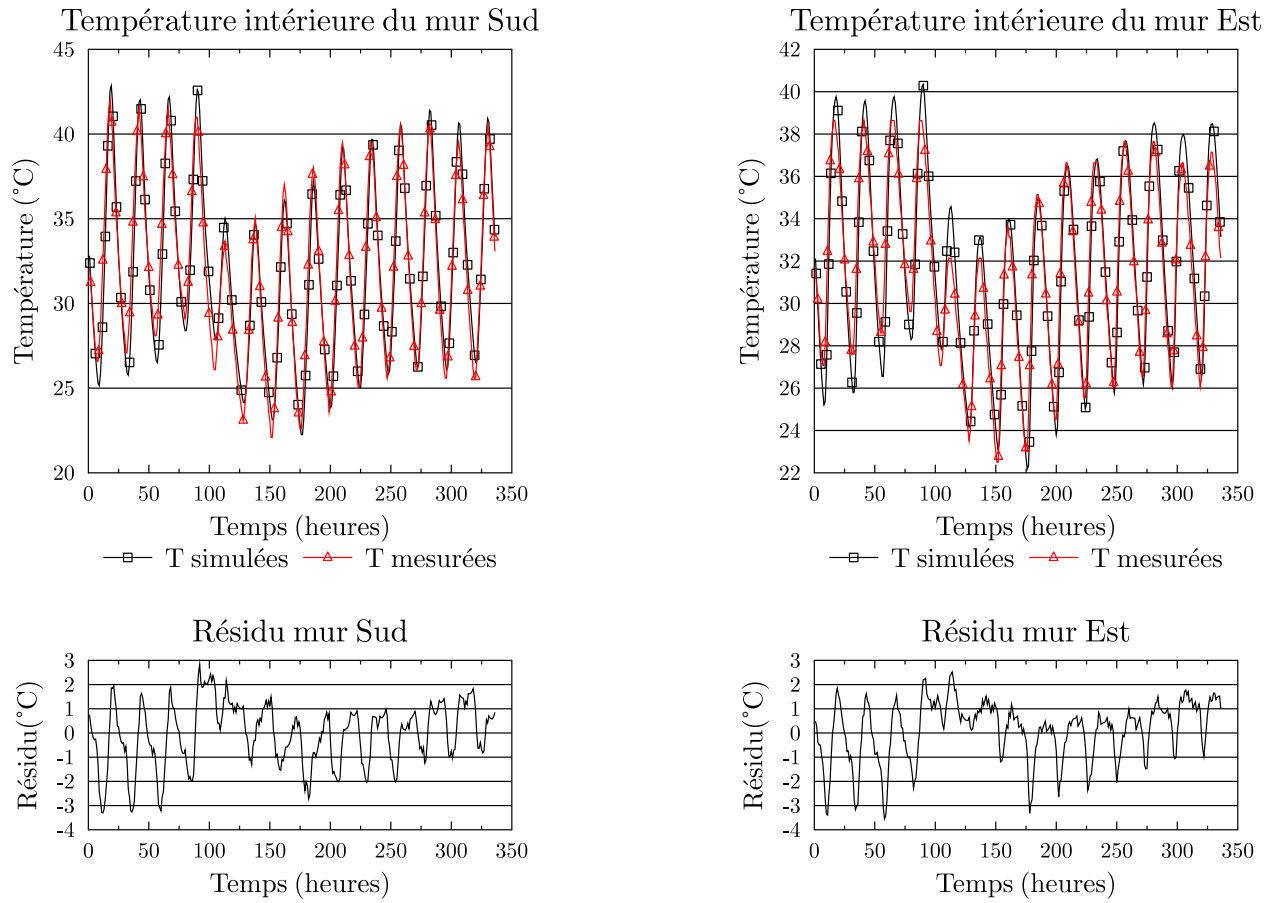


FIGURE 3.14 – Les températures mesurées et simulées : parois Sud et Est

leillement. Au coucher du soleil les parois continuent de se refroidir par radiation. Le déphasage entre les courbes s'explique par les positions du soleil sous la latitude de Ouagadougou. On peut relever que les murs Sud et Ouest restituent la chaleur tardivement.

La Figure 3.16 présente les apports et les pertes d'énergie dans la zone dus aux infiltrations de l'air extérieur ainsi que le taux de renouvellement. Ces courbes nous offrent peu d'informations, car dans notre expérimentation nous avons opté de minimiser les infiltrations.

3.6. Conclusion

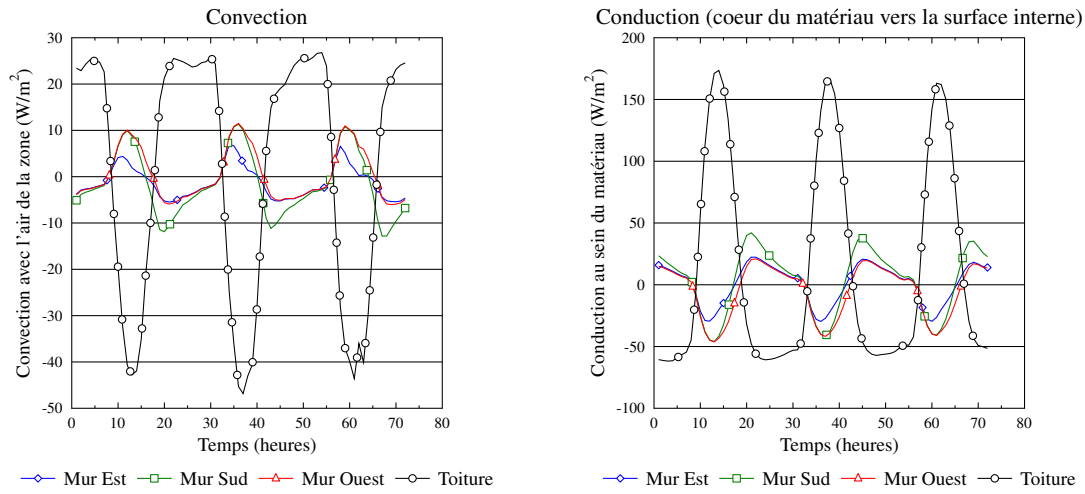


FIGURE 3.15 – Phénomène de convection et de conduction en cours dans le bâtiment

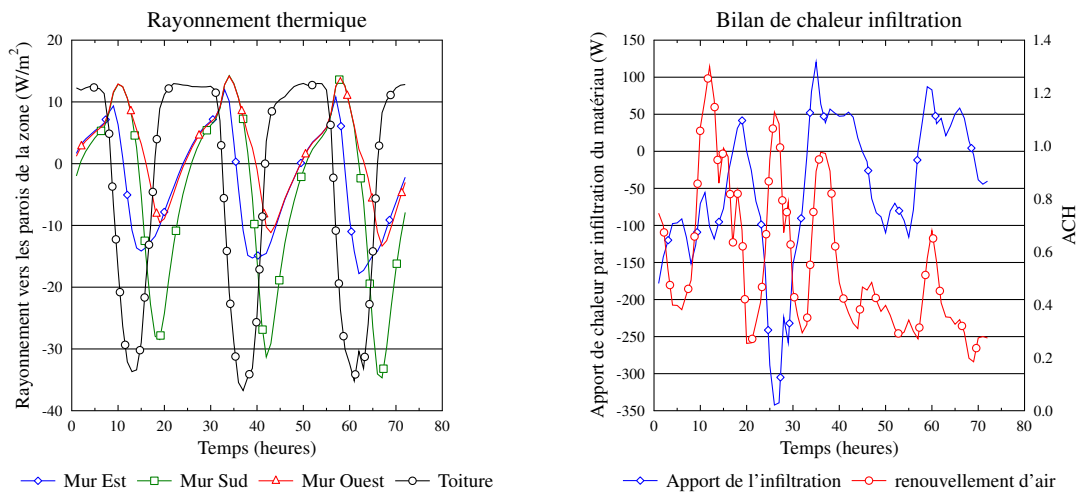


FIGURE 3.16 – Phénomène de rayonnement et échange de chaleur dus à l'infiltration

3.6 Conclusion

La simulation peut être un outil d'étude des bâtiments existants afin de mieux comprendre les différentes interactions et phénomènes en cours. Pour cela les pré-

Chapitre 3. Confrontation des résultats de simulation à l'étude expérimentale d'un bâtiment situé en Afrique sub-saharienne

dictions doivent être à mesure de d'approcher les mesures réelles. Dans ce chapitre une approche analytique est utilisée pour approcher le comportement d'un bâtiment réel. Au cours de la mise en œuvre de cette démarche diagnostique, et à travers l'analyse de sensibilité locale plusieurs enseignements peuvent être tirés. Les modèles doivent être nourris par des données d'entrées qualitatives. Les données utilisées pour la calibration proviennent essentiellement de la littérature et démontrent le manque d'information sur les propriétés thermo-physiques et optiques des matériaux de construction (modernes comme traditionnels).

Les études diagnostiques menées permettent d'appréhender le fonctionnement du bâtiment qui dans notre cas est en évolution libre. Les paramètres les plus importants étant les propriétés de surface, cela attire notre attention sur les échanges de chaleur par rayonnement dans notre contexte climatique et pour ce type de construction. Les investigations menées sur le bilan thermique avec le modèle calibré démontrent que la toiture métallique est un maillon faible du point de vue thermique mais, son coût et la facilité de mise en œuvre en font un matériau très utilisé. On peut relever aussi en amont les composants transparents et les ouvertures à destination de fenêtre qui ont la faculté de transmettre le rayonnement solaire. De ce constat, nous allons traiter des solutions passives permettant d'améliorer les performances thermiques des composants et du bâtiment à travers des applications de la simulation comme outil d'aide à la conception dans le prochain chapitre de cette thèse.

Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

Sommaire

4.1	Étude du confort thermique dans le bâtiment expérimental	90
4.1.1	Les paramètres de la simulation	90
4.1.2	Évaluation du confort dans la configuration initiale	91
4.2	Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture	96
4.2.1	Amélioration des éléments de toiture	97
4.2.2	Amélioration des performances thermiques des ouvertures . .	111
4.3	Études comparatives du confort thermique par la simulation	128
4.3.1	Impact des surfaces réfléchissantes sur le confort thermique .	128
4.3.2	Amélioration du confort thermique par les ouvertures	130
4.3.3	Comparaison des différentes configurations et analyse des heures d'inconfort	136
4.4	Conclusion	139

Dans ce chapitre il s'agira d'une application des outils de simulation comme aide à la conception des bâtiments en Afrique sub-saharienne. Après l'étape de diagnostique au Chapitre 3, nous justifions dans un premier temps les choix des éventuelles solutions à travers des éléments de littérature. La simulation est utilisée pour caractériser les performances énergétiques d'un bâtiment de construction conventionnelle au Burkina Faso à travers des études comparatives sur le confort et les besoins en refroidissement face à la sévérité du climat. Pour ce faire des modèles de techniques de refroidissement passif sont implémentés et analysés en utilisant des approches innovantes de la simulation. Ensuite des études paramétriques sont appliquées à chaque étape dans le but de mettre en évidence les paramètres influents sur le confort thermique dans les bâtiments contemporains.

4.1 Étude du confort thermique dans le bâtiment expérimental

4.1.1 Les paramètres de la simulation

4.1.1.1 Scénario des charges internes

Pour évaluer le confort, le comportement des occupants et le fonctionnement des charges internes doivent être modélisés. Il est unanimement reconnu que la modélisation des charges internes est source d'importantes incertitudes dans la simulation du bâtiment. Cela constitue une difficulté supplémentaire lorsque l'on veut modéliser les occupants dans les pays africains. Dans ces pays le secteur du travail n'est pas homogène et le secteur informel est prédominant. A cela on peut ajouter les facteurs culturels propres à ces régions. Pour le cas du Burkina Faso, les heures officielles du travail sont : de 7h à 12h 30 mn et de 15h à 17h 30 mn.

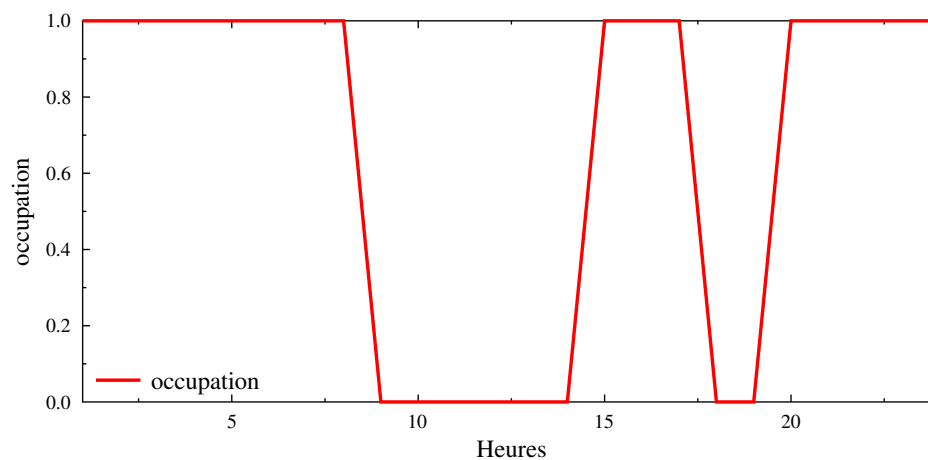


FIGURE 4.1 – scénario d'occupation

Le bâtiment étudié dans notre cas étant une résidence familiale, un ménage de 3 individus est pris en compte dans la définition du scénario d'occupation du bâtiment. Les taux métabolique M considérés sont de 120W et 70W respectivement pour des individus assis au repos et en état de sommeil. Les gains de chaleur sensible

4.1. Étude du confort thermique dans le bâtiment expérimental

sont déterminés par la formule suivante **EnergyPlus8.00 (2013)** :

$$\begin{aligned} S = & 6.461927 + 0.946892 * M + 0.0000255737 * M^2 + 7.139322 * T \\ & - 0.0627909 * M * T + 0.0000589172 * T * M^2 - 0.198550 * T^2 \\ & + 0.000940018 * T^2 * M - 0.00000149532 * T^2 * M^2 \end{aligned} \quad L = M - S \quad (4.1)$$

Avec M : la chaleur métabolique ; T la température de l'air ; S : les gains sensibles ; L : les gains latents. Les autres sources internes de chaleur sont les équipements électriques : 75 W pour l'éclairage artificiel, 75W pour le téléviseur et 100W pour les brasseurs d'air et les autres équipements. La résistance de l'habillement des occupants de 0.51 clo¹, équivalent à un pantalon et une chemise manche courte (**standard ASHRAE55, 2004**). La simulation a été menée dans des conditions d'air calme avec une vitesse d'air de 0.5m/s dans le bâtiment.

4.1.1.2 Les conditions climatiques

Les données météorologiques utilisées proviennent d'un fichier TMY2 de Ouagadougou. Les fichiers TMY établis sur la base d'une compilation de 30 ans, proposent une année type de la zone considérée. Ces données peuvent être utilisées aussi bien pour des études de conception que pour le dimensionnement des équipements techniques.

4.1.2 Évaluation du confort dans la configuration initiale

Dans de nombreux pays de l'Afrique un grand nombre de bâtiments sont en évolution libre. En raison des ressources financières et des ressources énergétiques limitées, les solutions actives restent inaccessibles dans le résidentiel. Très souvent le seul équipement CVC se résume aux brasseurs d'air (plafonnier ou sur pied) qui permettent d'augmenter la vitesse de l'air. Comme nous l'évoquons au Chapitre 1 l'application de l'approche de Fanger n'est pas conseillée pour évaluer le confort dans les bâtiments naturellement ventilés. Pour les bâtiments en évolution libre le confort adaptatif peut s'appliquer mais dépend du contexte dans lequel les sondages ont été menés. Le standard de confort adaptatif de l'ASHRAE est adopté de par son caractère international et est comparé à la zone de confort de Givoni.

4.1.2.1 Évaluation selon la zone de confort thermique de Givoni

Les températures et les humidités absolues simulées sont reportées sur le diagramme bioclimatique de Givoni. La Figure 4.2 montre la répartition des températures opératives pendant les périodes d'occupation. 22.94% des heures d'occupation se trouvent dans la zone de confort. Si on prend en compte l'extension de la zone

1. unité mesurant l'isolation thermique utilisée pour les vêtements, 1 clo = 0,155 K m²/W

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

de confort due à l'augmentation de la vitesse de l'air, les heures d'occupation se trouvant dans le confort représentent 43.62%. Dans ce cas, 57,38% des heures d'occupations se trouveront hors des zones de confort.

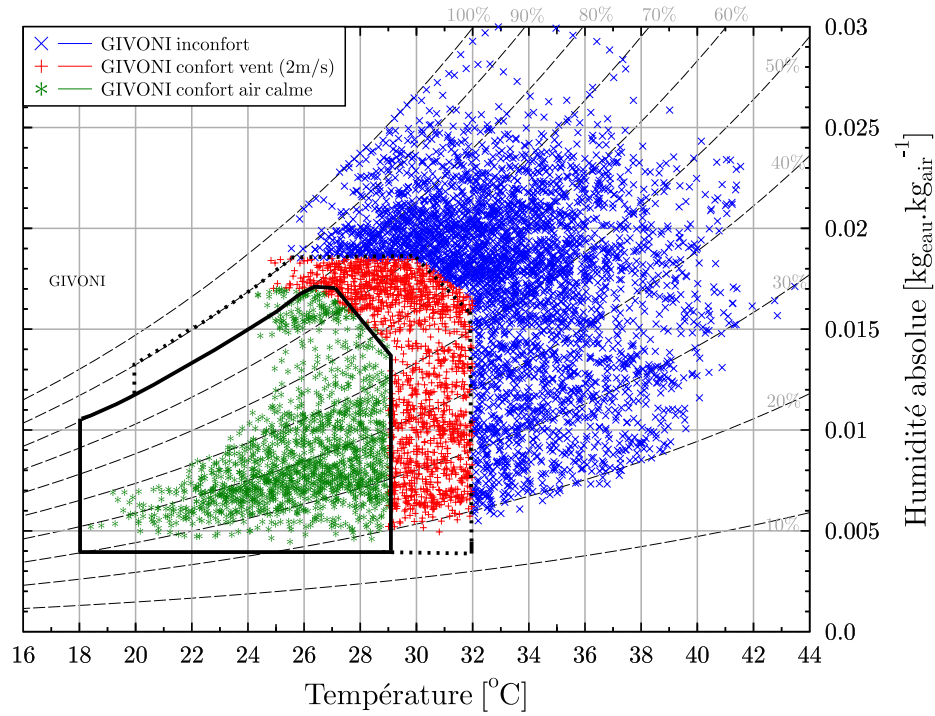


FIGURE 4.2 – Évaluation du confort thermique par le diagramme bioclimatique de Givoni dans configuration Initiale

Les Figures 4.3 et 4.4 évaluent le confort thermique pour des périodes froides et chaudes. Durant la période chaude étudiée, en recoupant les points on aperçoit que seuls quelques points rentrent dans la zone de confort de Givoni. En revanche pour les périodes froides, on observe que la période de confort est plus élevée dans le bâtiment. Avec cette évaluation du confort par la méthode de Givoni, on note qu'il n'y a pas d'inconfort dû au froid. Les heures d'inconfort sont essentiellement dues aux surchauffes.

4.1. Étude du confort thermique dans le bâtiment expérimental

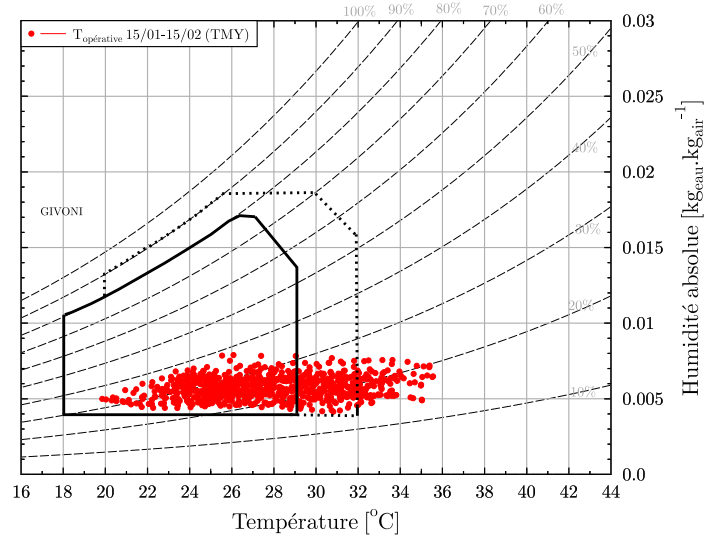


FIGURE 4.3 – Évaluation du confort thermique par la méthode de Givoni dans configuration Initiale : mois type froid

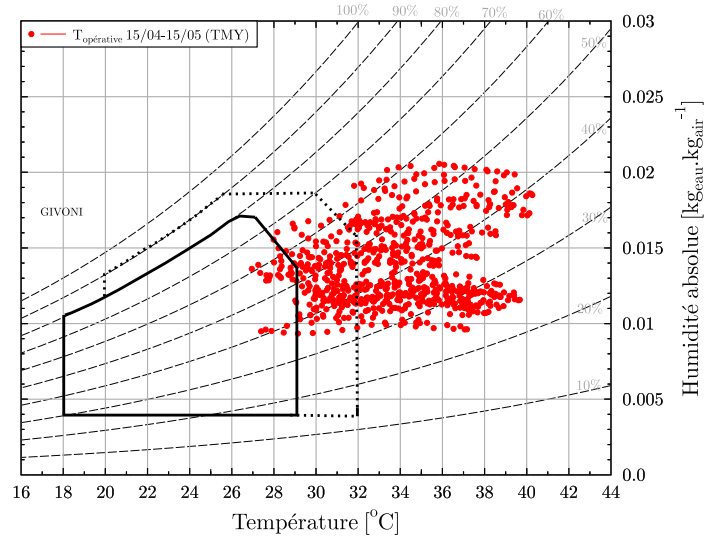


FIGURE 4.4 – Évaluation du confort thermique par la méthode de Givoni dans configuration Initiale : mois type chaud

4.1.2.2 Évaluation selon la méthode de confort adaptatif de l'ASHRAE

Le modèle de confort adaptatif de l'ASHRAE a été établi grâce à une série d'enquêtes menées dans plusieurs contextes climatiques à travers le monde. Ce standard

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

est appliqué à la configuration initiale du bâtiment à travers le modèle calibré.

La Figure 4.5 évalue les températures opératives pendant les heures d'occupation par rapport aux températures de confort thermique attendues de la configuration de référence du bâtiment (la tôle en contact avec l'air de la zone). Pour toute l'année, 29,36% des heures d'occupations se trouvent dans la plage de 90% d'acceptabilité. La plage de 80% d'acceptabilité représente 41,01%. Environ 60% des points sont hors des limites recommandées. Les températures ont été réparties en fonction des mois. Pour les mois de Janvier, Février et Décembre qui constituent les mois les plus froids, on observe des heures d'inconfort dues au refroidissement avec le confort adaptatif. Cela cadre bien avec le vécu des populations qui pendant ces périodes, ressortent les habits d'hiver. Les mois pluvieux (Juin, Juillet, Août et Septembre) sont caractérisées par des températures proches des limites inférieures du confort thermique. Plus le mois est chaud, plus les points de confort s'éloignent des limites inférieures.

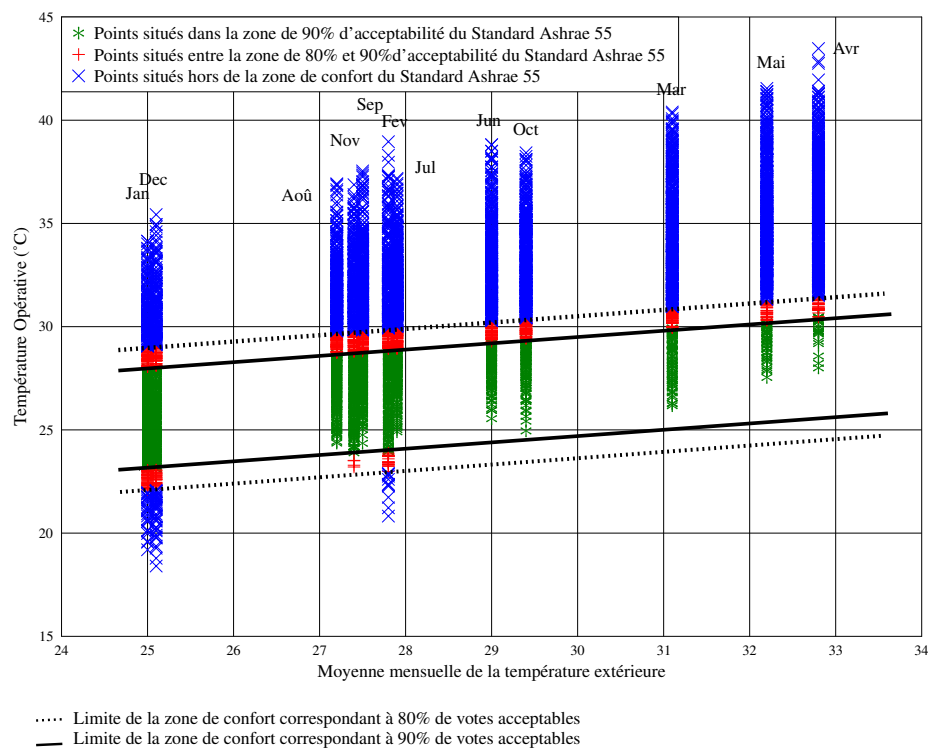


FIGURE 4.5 – Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans configuration Initiale

4.1. Étude du confort thermique dans le bâtiment expérimental

En comparant les deux méthodes utilisées pour évaluer le confort, les ratios sont du même ordre de grandeur mais pour l'AHSRAE 55, l'inconfort dû au refroidissement est apparu. Cela cadre bien avec le vécu des populations qui pendant les périodes de froids ressortent les habillements d'hiver. Le confort adaptatif constitue une piste intéressante à explorer dans les climats tropicaux de l'Afrique sub-saharienne.

4.1.2.3 Analyse de sensibilité locale : bâtiment en évolution libre

Dans le but d'identifier les éléments de l'enveloppe qui ont le plus d'influence sur le confort thermique dans les bâtiments en évolution libre, une analyse de sensibilité locale est conduite. Cette étude suit les étapes préalablement décrites au Chapitre 3. Les paramètres du modèle calibré du bâtiment (plus les charges internes) subissent une variation δP_i de $\pm 10\%$ et on observe la sensibilité δI de la période d'inconfort annuelle. Ces heures d'inconfort thermique sont évaluées en appliquant le confort adaptatif de l'ASHRAE.

Vingt paramètres ont été identifiés pour cette étude paramétrique. Il s'agit des paramètres suivants :

- La conductivité λ , la masse volumique ρ et la chaleur spécifique C des différentes couches composant le mur et la toiture ;
- Les propriétés optiques que sont l'émissivité ε et l'absorptivité α pour les parois interne et externe de la maçonnerie et de la toiture ;
- La ventilation D_{vent} ;
- Les épaisseurs des enduits E_e ;
- L'épaisseur des briques E_{agg} de l'enveloppe et des cloisons.

Le débit de ventilation naturelle est aussi observé.

La Figure 4.6 présente les sensibilités des propriétés de l'enveloppe et de la ventilation sur les heures totales d'inconfort pour toute l'année. Les propriétés de surface des matériaux, sont très influentes sur le confort thermique dans le bâtiment. L'augmentation de l'émissivité extérieure ε_{Te} du toit contribue à améliorer le confort. Le phénomène inverse est observé au niveau de l'absorptivité solaire α_{Te} de la surface extérieure du toit. Ces paramètres influencent la température du toit et par conséquent les échanges par convection avec l'air de la zone. Les propriétés de surface de la face interne du toit impactent faiblement sur le confort thermique. En effet ces paramètres influencent indirectement la température de l'air car ils définissent les échanges thermiques par rayonnement entre le toit et les autres surfaces opaques de la zone. Il en est de même pour l'émissivité ε_{Mi} et l'absorptivité α_{Mi} de la paroi interne des murs. Concernant les propriétés de surface extérieures des composants verticaux, ces paramètres ont des indices de sensibilité très élevés. Une diminution de l'émissivité du mur extérieur ε_{Me} se traduira par une dégradation du confort et vice versa. La perturbation du coefficient d'absorptivité solaire extérieure des murs

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

α_{Me} , a un grand impact sur les heures d'inconfort. Une faible absorptivité a une influence positive sur le confort thermique.

Les propriétés thermo-physiques de la toiture n'ont pas d'influence sur le confort thermique des occupants. Cela est dû à la faible épaisseur des tôles et à l'intensité de l'ensoleillement dans la région. Concernant les propriétés thermo-physiques des éléments de maçonnerie, la diminution de la capacité calorifique, de la masse volumique et l'épaisseur sont favorables au confort thermique. En effet, les variations de la masse volumique et la chaleur spécifique tendent à réduire le produit $\rho.C$ qui caractérise la capacité de stockage des matériaux. C'est aussi le cas pour une épaisseur plus faible qui induira une diminution de la capacité à stocker l'énergie. L'influence positive d'une conductivité thermique élevée sur le confort s'explique par l'impact de l'augmentation que cela induira sur la diffusivité ($d = \frac{\lambda}{\rho.c}$) des matériaux. La diffusivité (m^2/s) décrit la rapidité du transfert de la chaleur à travers le matériau et une valeur plus élevée aura un impact sur le stockage. Dans les bâtiments en évolution libre, les parois internes des murs absorbent de la chaleur pendant la journée et la restituent à la zone pendant les heures nocturnes. Vis à vis de l'extérieur les parois verticales ont le même comportement. Cette étude recommande une enveloppe avec une capacité de stockage faible et des surfaces hautement réfléchives. Ainsi les parois stockeront moins d'énergie et le refroidissement nocturne sera plus efficace. Des travaux doivent être effectués pour trouver des optimum de ces paramètres au niveau des propriétés thermo-physiques et des épaisseurs des parois opaques.

4.2 Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

Les résultats de l'analyse de sensibilité montrent bien que la toiture métallique a un impact très élevé sur le confort thermique dans les bâtiments conçus dans les régions tropicales. En raison du climat et de l'inadaptation des matériaux de construction, les conditions thermiques à l'intérieur des bâtiments restent supérieures aux limites acceptables de confort thermique pendant de longues périodes de l'année. Comme spécifié dans les chapitres précédents, les types de construction et les matériaux contemporains dans ces régions rendent le bâtiment vulnérable aux rayonnements solaires. Parmi les composants de l'enveloppe du bâtiment, le toit est l'un des éléments le plus exposé au rayonnement solaire, qui influe sur les gains de chaleur. A cela on peut ajouter les fenêtres qui utilisent des matériaux susceptibles de transmettre directement les rayons du soleil à l'intérieur du bâtiment. Les solutions d'atténuation des apports solaires telles que les systèmes de refroidissement passifs et à faible consommation d'énergie ne sont pas suffisamment explorées. Elles

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

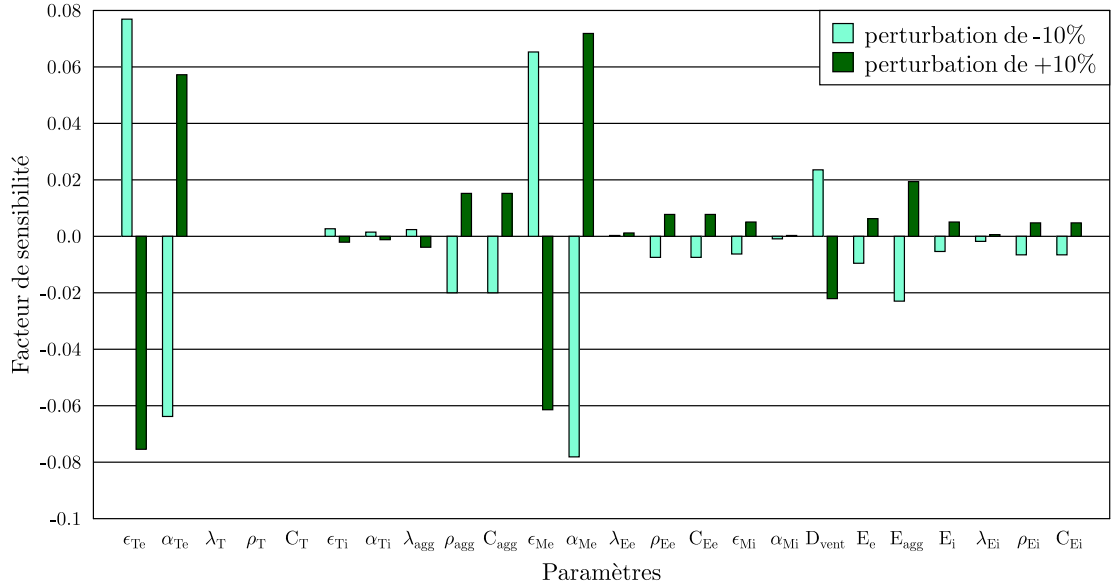


FIGURE 4.6 – Influence des paramètres d’entrée sur la période d’inconfort dans le cas d’un bâtiment en évolution libre

peuvent être utilisées pour répondre à une partie des besoins de refroidissement dans les bâtiments, mais leurs potentiels et performances dépendent de la zone climatique. Dans cette partie il sera question d’évaluer les impacts des solutions passives sur l’amélioration des performances thermiques de la toiture et des ouvertures.

4.2.1 Amélioration des éléments de toiture

4.2.1.1 Introduction

Parmi les composants de l’enveloppe du bâtiment qui sont en contact avec l’environnement extérieur et en particulier le rayonnement solaire, la toiture en raison de son exposition, est la partie la plus vulnérable. Elle joue un rôle important dans la performance thermique des bâtiments en transférant la chaleur par rayonnement vers les autres composants et en échangeant par convection avec l’air de la zone. [Nahar, Sharma, and Purohit \(1999\)](#); [Toguyeni et al. \(2012\)](#) relève que le toit peut être responsable de près de 50% des besoins en refroidissement des bâtiments dans les climats chauds. A travers les résultats expérimentaux présentés dans le chapitre précédent, on a pu noter les niveaux de température diurne que peut atteindre une

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

toiture métallique sous les conditions climatiques de Ouagadougou. La réduction des températures des parois opaques du bâtiment entraîne une réduction des flux de chaleur vers l'environnement intérieur du bâtiment synonyme d'économies d'énergie dans les bâtiments climatisés et de réduction du stress thermique dans les bâtiments en évolution libre (Synnefa, Santamouris, and Akbari, 2007; Hernández-Pérez et al., 2014; Akbari, 2003). Il existe plusieurs stratégies passives pour réduire contribution de la toiture aux apports de chaleur à l'intérieur du bâtiment. Sanjai and Chand (2008), classent les techniques passives permettant d'améliorer les performances thermiques des toitures en méthodes architecturales et non-architecturales. Les méthodes architecturales sont liées à la configuration et la géométrie du toit (toiture en voûte, en forme de dôme, et la ventilation). Les méthodes non-architecturales (barrières anti-rayonnements, isolation, ombrage, surfaces réfléchissantes) peuvent être utilisées indépendamment des géométries de la toiture.

La ventilation du comble ou de l'entretoit est pratiquée comme mesure pour diminuer sa température, réduire la chaleur à extraire pour le refroidissement dans un espace occupé ou pour l'évacuation de l'humidité. Dans les travaux de Susanti, Homma, and Matsumoto (2011), des comparaisons ont été faites entre une toiture ayant une cavité soumise à la ventilation naturelle et une simple toiture au Japon. Les résultats montrent que ce type de ventilation permet de réduire la température opérative d'environ 4,4 °C et améliore de ce fait la durée de vie du système de conditionnement d'air en réduisant l'énergie nécessaire pour le refroidissement.

Hernández-Pérez et al. (2014) dans son article de revue bibliographique, fait un tour d'horizon des productions scientifiques traitant de l'utilisation des toitures réfléchissantes comme solution pour éviter les apports solaires. Il est ressorti que les techniques de traitement des surfaces sont appropriées pour les climats chauds : plus le climat est chaud, plus les effets sont importants. Il note que la plupart des études menées par la simulation montrent que les économies d'énergie sont plus importantes dans les bâtiments mal isolés. Haberl (2004) note que, selon la littérature sur l'amélioration des toitures par l'utilisation de matériaux réfléchissant aux États-Unis, les économies d'énergie réalisées sont comprises entre 3% et 35%, et dépendent des niveaux d'isolation, et de la configuration du comble. Özdeniz and Hancer (2005) ont étudié les configurations de toiture qui permettent d'améliorer le confort thermique d'un climat chaud comme dans le cas de Famagouste en Turquie. Dans son document, il note que les toits avec isolation thermique ont une meilleure performance en fonction de la position de l'isolant. Il est également apparu que les matériaux ayant une faible absorptivité solaire à l'extérieur affectent positivement la performance thermique du toit. Dans certains pays comme les États-Unis et l'Australie, des barrières contre le rayonnement thermique sont largement utilisées dans les bâtiments et il existe des normes concernant les spécifications techniques (ASTM C1313 (2010)). Les barrières anti-rayonnement sont constituées d'un matériau fortement réfléchissant dans l'infrarouge de grandes longueurs d'onde, généralement

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

une feuille d'aluminium, qui est appliquée sur une ou deux faces de matériaux tels que le papier kraft ou des films plastiques.

Afin d'évaluer l'impact des techniques de refroidissement sur le composant toit, des solutions architecturales (comble et de ventilation naturelle) et non-architecturales (revêtements réfléchissants, barrière anti-rayonnements et isolation) ont été modélisées et évaluées en utilisant la simulation dynamique.

4.2.1.2 Méthodologie et simulation

4.2.1.2.1 Les types de toitures

Afin d'évaluer l'impact des stratégies passives sur les performances de l'enveloppe, plusieurs configurations de la toiture ont été modélisées et intégrées au modèle détaillé du bâtiment calibré au chapitre 3. Deux configurations principales de toiture en acier galvanisé sont rencontrées au Burkina Faso : il y a le cas où la face interne du toit métallique est en contact direct avec l'air de la zone occupée et l'autre cas qui est une amélioration de la première configuration se compose d'un toit en tôle, et d'un faux plafond de contreplaqué en bois avec des ouvertures pour la ventilation. Pour le cas du bâtiment étudié, la ventilation est assurée par des ouvertures au niveau des façades Nord et Sud. La taille de ces ouvertures semble n'obéir à aucun principe de conception. Ce dernier cas constitue la stratégie la plus utilisée dans les bâtiments pour éviter les apports solaires par le toit. Dans certaines configurations le contreplaqué est remplacé par des plaques de plâtre. En se basant sur ces deux configurations, nous évaluerons l'impact de l'utilisation des méthodes architecturales et non-architecturales par la simulation. Pour la solution architecturale, la ventilation naturelle a été modélisée. Les revêtements réfléchissants, l'isolation et la barrière anti-rayonnement constitueront les solutions non-architecturales étudiées. Les simulations sont menées avec le fichier météo de l'année en cours.

4.2.1.2.2 Modélisation et outils de simulation

EnergyPlus est utilisé pour la modélisation et la simulation. Il permet la simulation de parois opaques de faibles épaisseurs telles que les couvertures métalliques. Les propriétés de surface du modèle de construction sont résumées dans le Tableau 4.1. Dans le cas de la configuration de toiture avec comble, le bâtiment est modélisé en deux zones. Le comble est une zone de 1 m de hauteur et le contreplaqué représente le plancher. La zone occupée voit le plancher du comble comme un plafond. Les ouvertures du comble sont modélisées comme des fenêtres. Les ouvertures sont positionnées dans le cas réel sur les façades Nord et Sud réalisant ainsi une configuration de ventilation traversante dans le comble. Plusieurs méthodes empiriques, ou zonales, ou relevant de la dynamique des fluides existent pour prédire les débits d'air [Allard and Santamouris \(1998\)](#). Pour cette étude, la norme britannique (Bri-

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

tish standard) qui est une méthode empirique (équation 4.1 et 4.2) sera utilisée pour estimer les débits de ventilation traversante. Le coefficient de décharge C_d est fixé à 0,6 (ASHRAE, 2009). Les coefficients de pression C_p sont des valeurs moyennes calculées par le programme pour un bâtiment rectangulaire de faible hauteur en utilisant la méthode de Swami et Chandra (EnergyPlus, 2013). Pour le bâtiment expérimental, nous avons quatre ouvertures de chaque côté faisant chacune un diamètre de 10cm. Comme le suggère Awbi (1994) dans un cas d'ouvertures multiples avec la même superficie, l'aire équivalente est égale à la somme des surfaces pour la configuration parallèle et la somme de leurs inverses en configuration série. Les formules British standard pour une ventilation traversante dans le cas où les ouvertures ont la même superficie deviennent les suivantes :

$$\text{Pour } \frac{V}{\sqrt{\delta T}} < 0.26 \sqrt{\frac{H}{\delta C_p}} Q = C_d A V \sqrt{\delta C_p} \quad (4.2)$$

$$\text{Pour } \frac{V}{\sqrt{\delta T}} > 0.26 \sqrt{\frac{H}{\delta C_p}} Q = C_d A \sqrt{2gH \frac{T_i - T_e}{\frac{(T_i - T_e)}{2}}} \quad (4.3)$$

Avec Q_{stack} : le débit de ventilation dû à la différence de température; C_d : le Coefficient de décharge; V : la vitesse moyenne du vent référence (Annexe); H : la hauteur entre les deux ouvertures opposées; T_i, T_e , les températures de l'air, à l'intérieur et à l'extérieur.

Le modèle de la ventilation est implémenté dans Dymola, un environnement Modélica et couplé à EnergyPlus par co-simulation via FMI (Modelisar, 2010b; Nouidui, Wetter, and Zuo, 2014). A chaque pas de temps les deux modèles sont simulés dans des environnements différents et les données sont échangées. Entre chaque pas de temps EnergyPlus échange des informations sur la température moyenne de l'air dans le comble, la température de l'air extérieur, la surface de l'ouverture et les coefficients de pression, dans le même temps FMU calcule le débit de ventilation de la prochaine étape et l'écrit dans EnergyPlus (Figure 4.7). Cela dénote un cas de couplage faible.

TABLE 4.1 – Propriétés de surface des matériaux

	Emissivité	Absorptivité solaire
peinture blanche	0.9	0.26
feuille d'aluminium	0.03	0.10
tôle prélaquée rouge	0.9	0.45

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

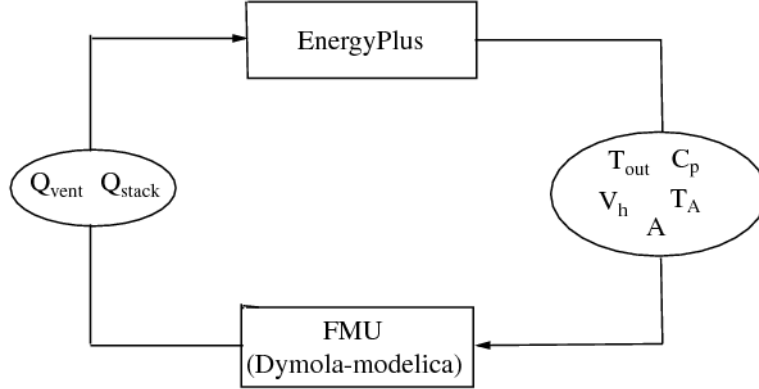


FIGURE 4.7 – Co-simulation EnergyPlus et Dymola via FMI

4.2.1.3 Résultats

4.2.1.3.1 Comparaison des deux configurations de toitures

La comparaison entre la configuration avec comble et celle de la toiture simple en acier galvanisé est présentée dans la Figure 4.8. Le comble se compose d'un espace d'air (1m d'épaisseur) et d'un contreplaqué en bois de 5 mm. On peut observer que les températures (Figure 4.8 A) pour le cas du comble sont amorties. Cela influe sur les températures à l'intérieur de la zone occupée. Pendant la journée (les pics représente les heures d'ensoleillement), les températures de l'air pour le cas du comble T_{zA} (Figure 4.8B) diminuent mais pendant la nuit (les creux) ces températures sont plus élevées que dans le cas du toit simple T_{airref} . On peut aussi relever le déphasage des pics de températures. En effet, pour un jour type on peut observer un facteur d'amortissement par rapport au cas de référence f (équation 4.4) de 4.7 et un déphasage par rapport au cas de référence (équation 4.5) ϕ entre les deux pics de 2h entre les températures de la face interne du toit et du plafond.

$$f = \frac{Max(T_{ref}) - Min(T_{ref})}{Max(T_A) - Min(T_A)} \quad (4.4)$$

$$\phi = t_{Max(T_{ref})} - t_{Max(T_A)} \quad (4.5)$$

Compte tenu des propriétés de l'air, il est bien connu que cet espace se comportera comme un isolant. L'espace d'air élimine l'effet du refroidissement du toit sur la zone occupée pendant les heures nocturnes. Ce qui explique les températures plus élevées pendant la nuit pour le cas du comble.

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

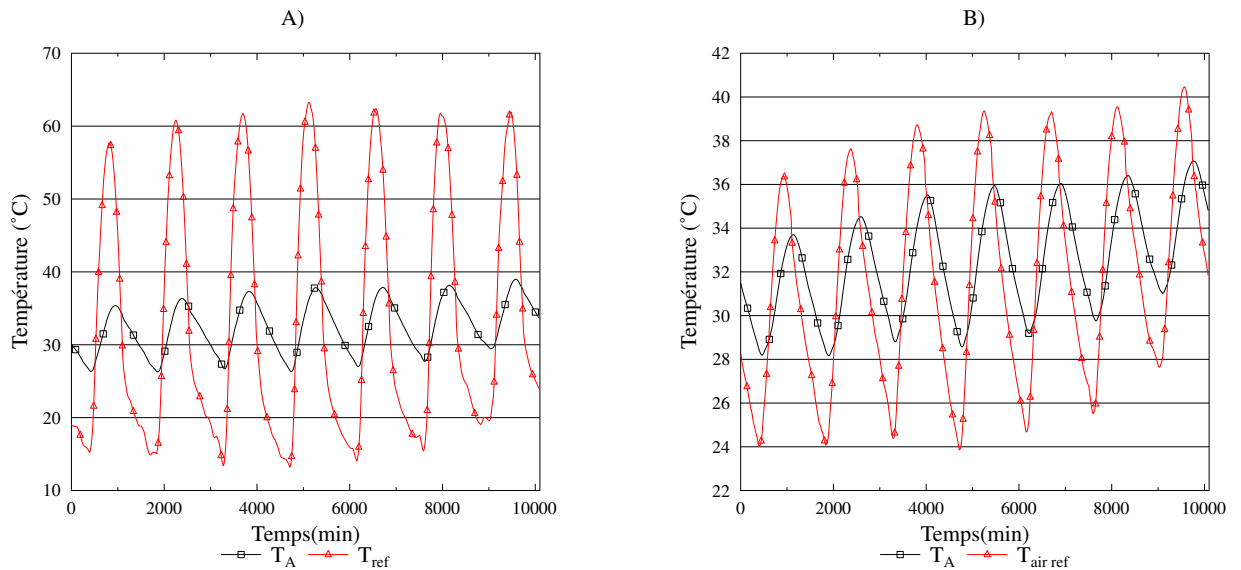


FIGURE 4.8 – Comparaison des deux configurations du toit

4.2.1.3.2 Cas de la toiture simple

Trois solutions sont présentées dans cette partie : la surface réfléchissante, la barrière anti-rayonnement et un cas d'isolation sous toiture (Figure 4.9). Les solutions consistant en des surfaces réfléchissantes ont été modélisées en utilisant les propriétés de surface d'un revêtement de couleur blanche (Tableau 4.1).

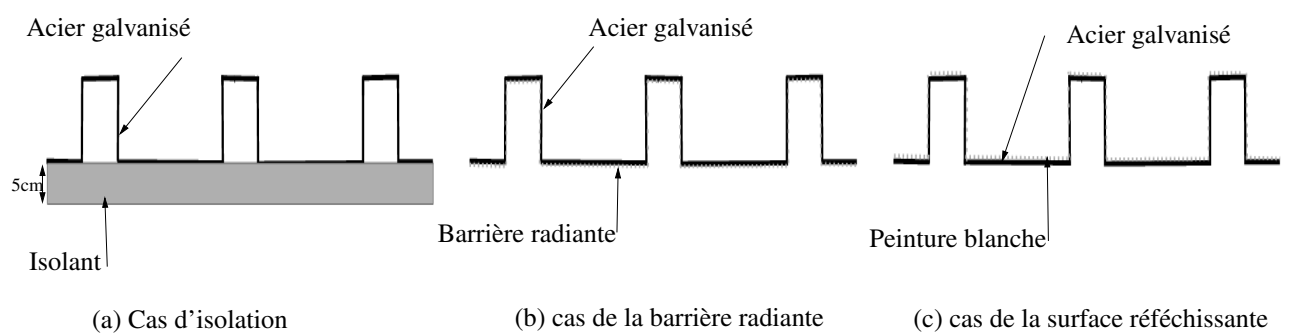


FIGURE 4.9 – Illustration des solutions passives pour le cas de toiture simple

Pour les cas d'isolation, à titre de comparaison une couche de 5 cm de laine de

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

verre est considérée dans le modèle. Cette couche est appliquée sur la face interne du toit. Pour les raisons de sur-coût et de maintenance que pourrait engendrer l'isolation de la toiture par l'extérieur, cette option ne sera pas abordée. La barrière anti-rayonnement est constituée d'une couche de feuille d'aluminium (Tableau 4.1).

Les Figures 4.10 et 4.11 indiquent la température de la face interne du toit et la température de l'air de la zone occupée. On observe une légère différence entre le cas de la barrière anti-rayonnement T_{rad} et le cas de référence T_{ref} . En effet, la barrière anti-rayonnement du fait de sa faible émissivité n'émet qu'une faible quantité de la chaleur stockée, ce qui explique la légère augmentation pendant les heures diurnes observée au niveau de la température du toit. Durant la nuit, la barrière anti rayonnement réduit les échanges radiatifs entre les parois verticales et la face interne du toit d'où une température légèrement plus faible que le cas de référence. Concernant la température de l'air dans le cas de la barrière anti-rayonnement T_{zrad} (Figure 4.11), on observe peu de différences par rapport au cas de référence (le facteur d'amortissement est proche de 1). Néanmoins les températures sont plus faibles traduisant ainsi l'atténuation des échanges radiatifs.

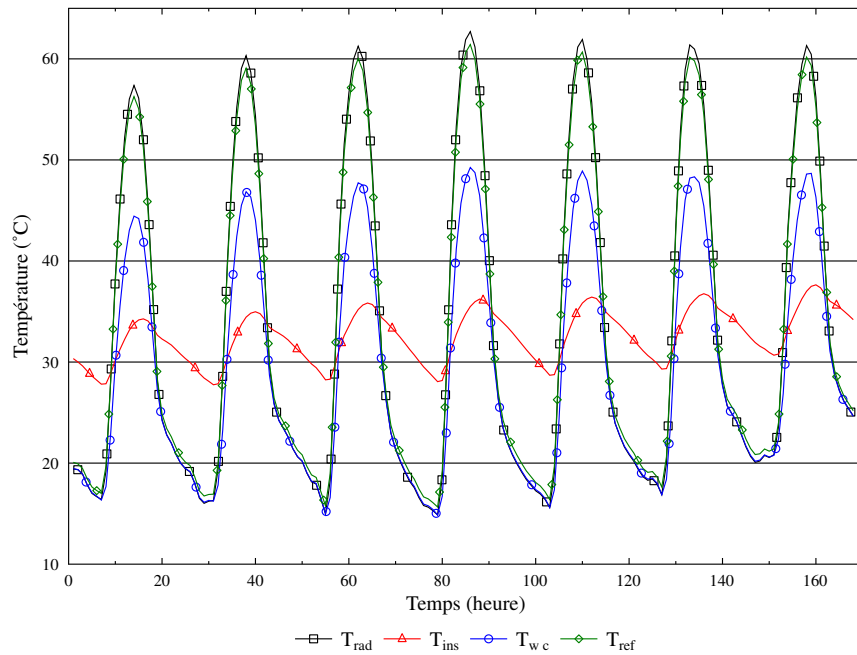


FIGURE 4.10 – Impact des solutions non-architecturales sur la température du toit

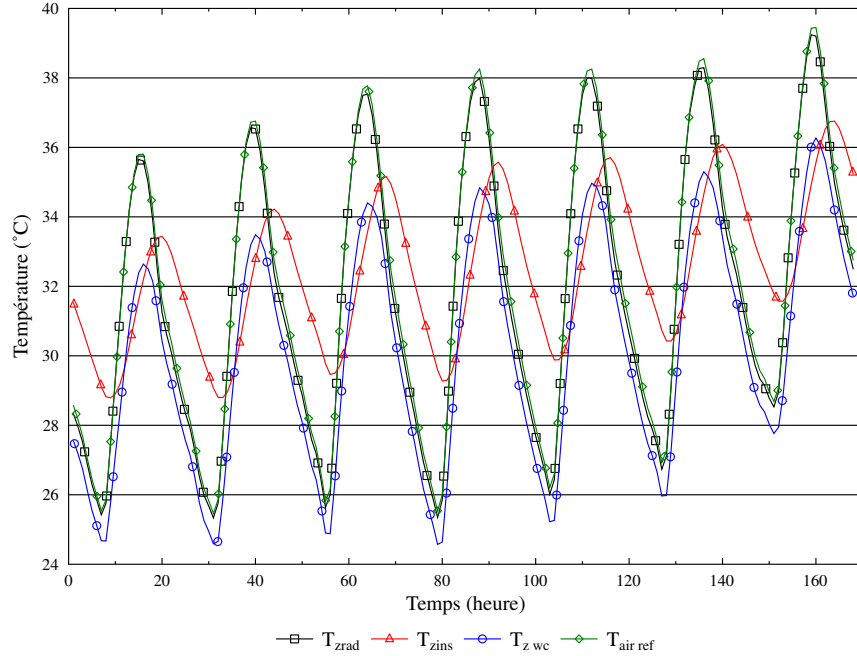


FIGURE 4.11 – Impact des solutions non-architecturales sur la température de l'air dans la zone

L'isolation en laine de verre de 5 cm sous l'acier galvanisé a un impact énorme sur les températures de la face interne T_{ins} et T_{zins} de l'air (Figure 4.10 et 4.11). L'isolation permet d'amortir la température et le déphasage par rapport au cas de référence est plus marqué comme pour le cas du comble. Cette observation est également valable pour la température de l'air de la zone occupée. La faiblesse de l'isolation se manifeste par sa performance au cours de la nuit quand le refroidissement du toit par le ciel et par convection de l'air est engagé. Le refroidissement pendant la nuit est un processus important pour les bâtiments en évolution libre. L'isolation peut être une option intéressante si on s'assure du potentiel de la ventilation naturelle nocturne.

Les surfaces de faible coefficient d'absorptivité solaire sont intéressantes. Concernant la température du toit T_{wc} , on observe un amortissement de $f = 1,5$ avec un déphasage nul. Les températures de l'air en journée sont moins élevées que pour les cas de l'isolation de 5cm et de la configuration avec comble. De plus, la solution de la surface réfléchissante n'a pas d'impact sur le refroidissement du toit durant les heures nocturnes. Les échanges thermiques (convection de l'air et rayonnement

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

avec le ciel) sont améliorés durant les heures nocturnes et la température de l'air dans la zone T_{zwc} (Figure 4.11) est en baisse en comparaison par rapport au cas de référence. Il en ressort que les surfaces de faible coefficient d'absorptivité sont performantes pour les bâtiments en évolution libre où l'acier est une paroi de la zone occupée. Cette solution requière de l'entretien car le coefficient d'absorptivité solaire de la surface est susceptible de se dégrader sous les effets de l'environnement et du vieillissement.

4.2.1.3.3 Cas de la toiture avec comble

Des simulations ont été effectuées pour observer l'impact des solutions non-architecturales sur la configuration de toiture avec comble. La Figure 4.12 illustre l'implémentation des solutions étudiées. Une amélioration par la barrière anti-rayonnement posée sur le côté comble du plafond, contribue à diminuer la température du faux plafond T_{A-rad} .

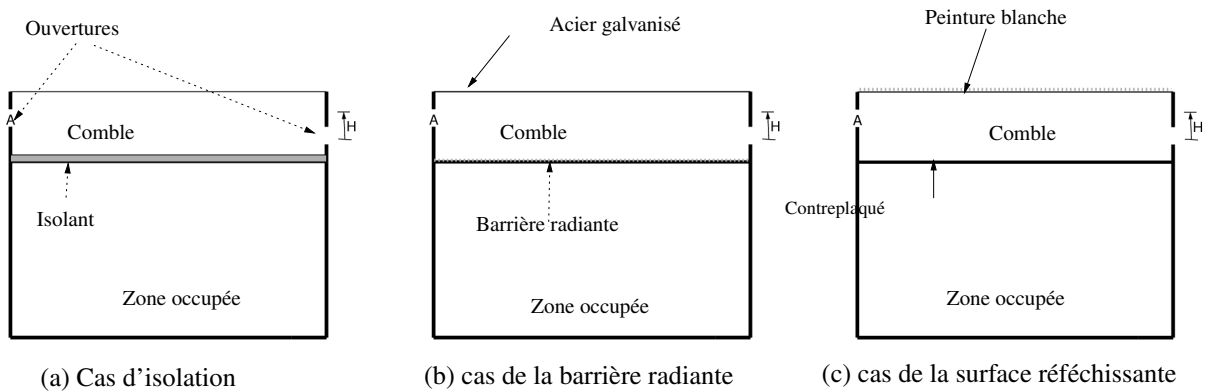


FIGURE 4.12 – Illustration des solutions passives pour le cas de comble

En effet, la surface anti-rayonnement réduit l'échange par rayonnement entre l'acier galvanisé et le contreplaqué en bois. Cela se traduit par un impact négligeable sur les températures de l'air de la zone occupée T_{A-zrad} pendant les heures d'ensoleillement. Nous pouvons observer que le comportement du cas de la barrière anti-rayonnement est différent du cas simple toiture. La barrière anti-rayonnement est plus efficace lorsqu'elle n'est pas en contact avec l'air de la zone occupée.

Ici une couche d'isolation supplémentaire faite de laine de verre est positionnée dans le comble sur le plafond. Cette couche impacte sur les extrêmes des profils de température journaliers du faux plafond T_{A-ins} (Figure 4.13,). S'agissant de la température de l'air dans la zone occupée T_{A-zins} (Figure 4.14), l'effet de l'isolation est plus significatif au niveau des creux où les températures sont plus

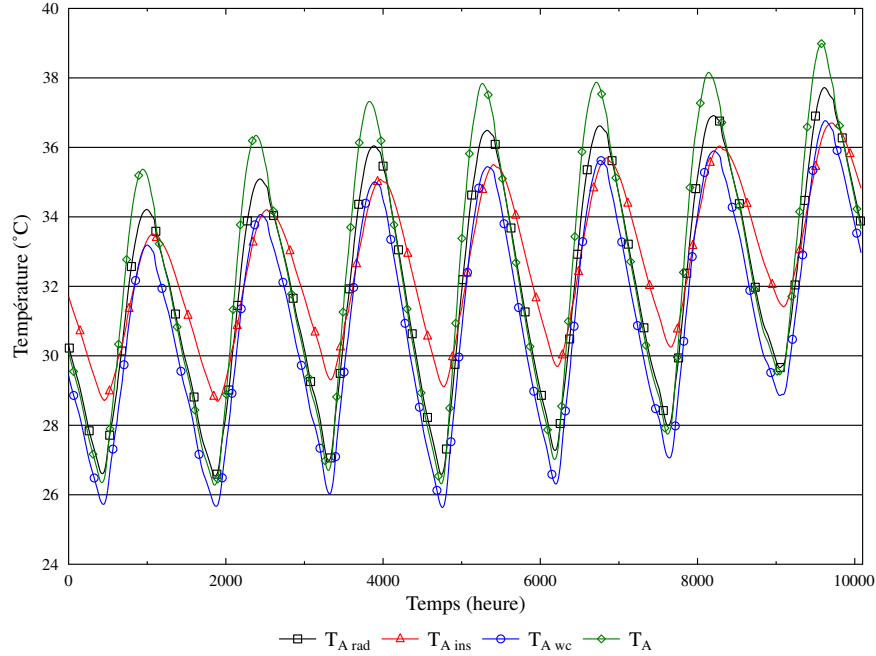


FIGURE 4.13 – Impact des solutions non-architecturales sur la température du plafond : cas du comble

élevées. L'isolation peut être intéressante pour les bâtiments climatisés et ceux exploités principalement pendant la journée. Elle est moins intéressante lorsque le bâtiment est utilisé pendant la nuit. Comme dans la section précédente la surface de faible coefficient d'absorptivité solaire est plus efficace car elle permet de réduire les températures ($T_{A \text{ wc}}$ et $T_{A \text{ -zwc}}$ Figure 4.13 et 4.14) dans la zone occupée en réfléchissant l'infrarouge de courtes longueurs d'onde. En comparant les Figures 4.13 et 4.10, il en ressort que dans le cas de la toiture simple, le bâtiment est mieux refroidi pendant la nuit. D'après les résultats des deux cas, on peut en conclure que les surfaces réfléchissantes combinées au comble sont plus efficaces pour réduire le gain de chaleur du toit en acier sous ce type de climat.

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

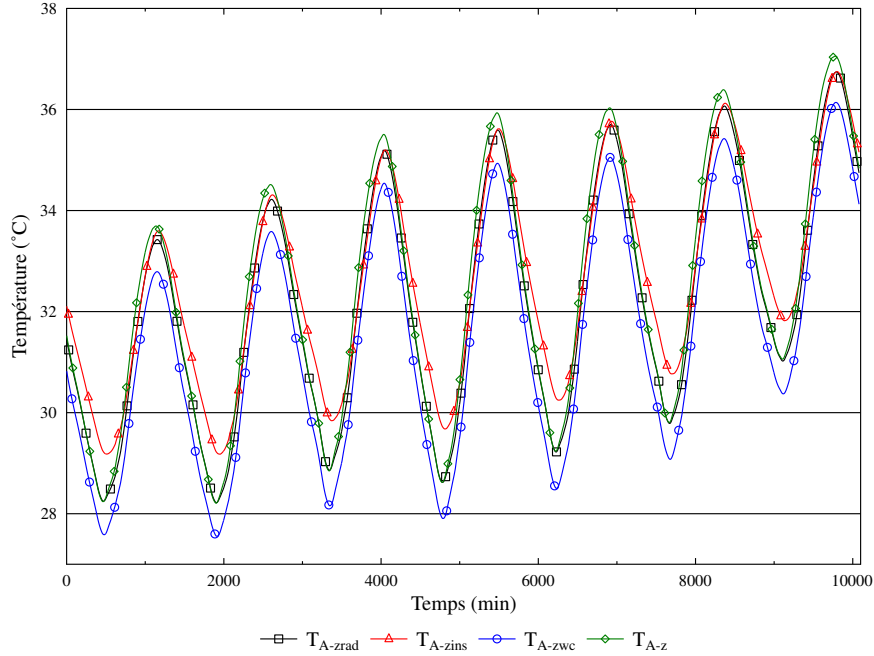


FIGURE 4.14 – Impact des solutions non architecturales sur la température de l’air dans la zone : cas du comble

4.2.1.3.4 La ventilation naturelle dans la configuration actuelle

Les ouvertures pour la ventilation des combles rencontrées dans cette région sont de faibles superficies et sont sur la même hauteur. Le débit de ventilation calculé selon la formule du British Standard se résumera à l’effet du vent. Une étude paramétrique est réalisée sur les ouvertures du comble en fonction de la hauteur entre les groupes d’ouvertures sur les faces opposées. La Figure 4.15 résume les résultats obtenus lorsque $H=0$ et pour différentes superficies équivalentes des ouvertures $T_{A=0.5m^2}$ $T_{A=1m^2}$. La température de plafond diminue légèrement lorsque la surface des ouvertures est augmentée. Cependant, cette baisse est négligeable ($f = 1$ et $\phi = 0$) pour les différentes solutions non-architecturales évaluées.

La Figure 4.16 montre les résultats de la température du plafond lorsque la différence des hauteurs est de 0,75 m. L’objectif est d’améliorer la composante de la ventilation générée par la différence de température entre l’air du comble et l’air extérieur. Il n’y a pas une nette différence entre les courbes de température du plafond pour les différentes configurations sauf au niveau des pics et des creux.

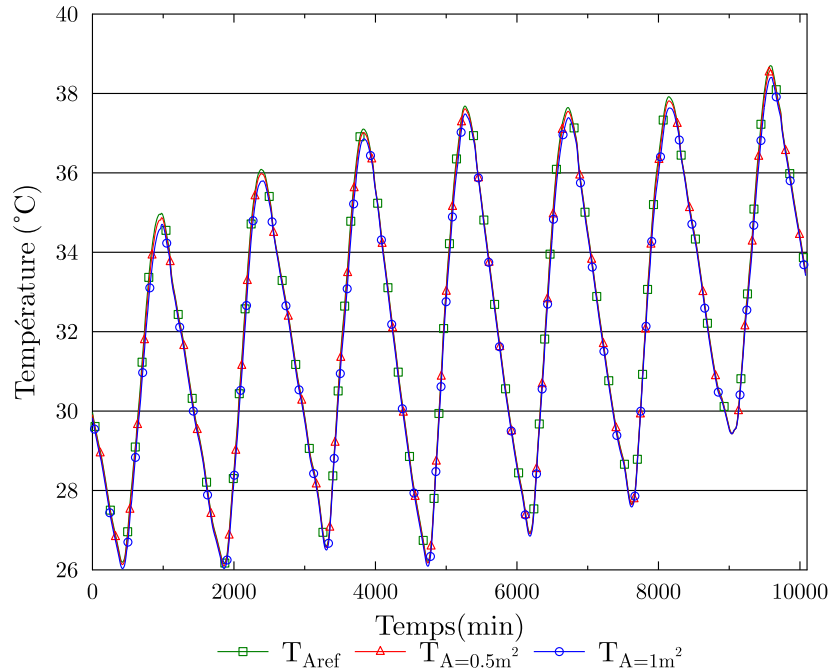


FIGURE 4.15 – Impact de la ventilation pour $H=0$

La ventilation naturelle du comble tend à augmenter la température maximale du plafond pendant la journée et diminuer la température nocturne (Figure 4.17). Malgré des taux de renouvellement d'air élevés, la ventilation n'améliore pas de façon significative les performances du comble dans le bâtiment en évolution libre dans notre cas. Le comble n'est pas conçu comme un conduit, mais une pièce d'étage supérieure de 1m de hauteur comportant des éléments lourds (les parois verticales). Cette configuration peut expliquer l'impact négligeable de la ventilation. A cela, on peut ajouter les conditions environnementales extérieures (vitesse de vent faible).

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

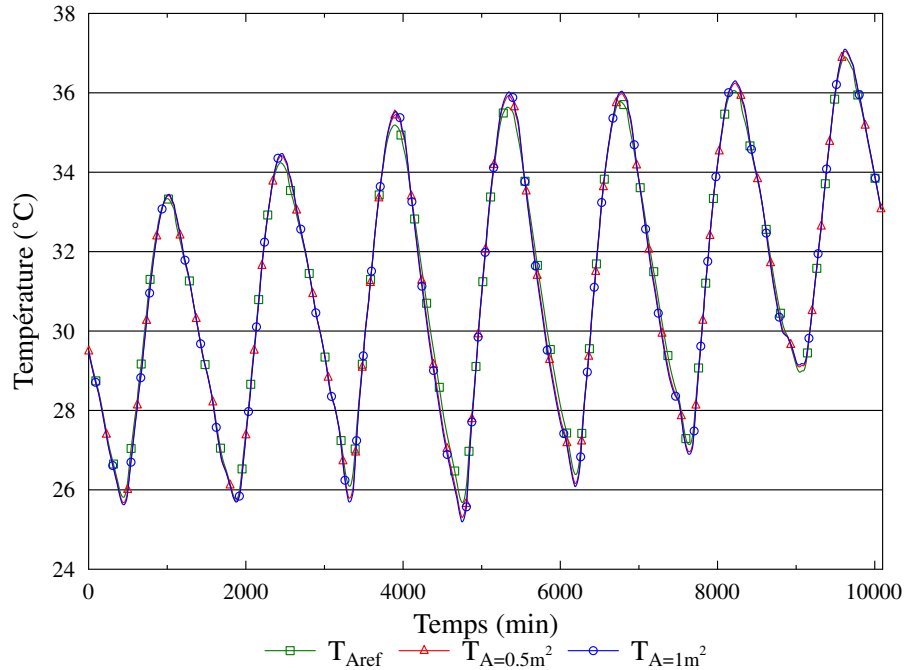


FIGURE 4.16 – Impact de la ventilation la température du plafond :cas du comble

4.2.1.4 Conclusion : amélioration des éléments de toiture

Une évaluation des techniques passives permettant d'améliorer les performances thermiques d'un toit en acier métallique dans les conditions climatiques de Ouagadougou a été présentée. Pour le cas de la toiture simple, la barrière anti-rayonnement réduit la température du toit mais, ne permet pas d'éviter le transfert de chaleur par convection entre l'air et la surface du toit chaud. L'isolation sur la paroi interne du toit conduit à une réduction de la température au cours de la journée, mais la température de l'air est plus élevée pendant les heures nocturnes. Cette solution est moins intéressante pour les bâtiments en évolution libre. Les cas de faible coefficient d'absorptivité solaire donnent de meilleures performances dans les configurations de toiture étudiées mais nécessite un entretien car les propriétés de surface varient en fonction du vieillissement et des intempéries. Concernant le cas du comble, l'isolation et la barrière anti-rayonnement, conduisent à des améliorations que l'on peut considérer comme moins intéressantes. Le potentiel de la ventilation comme solution a été également étudié et l'amélioration de la ventilation influe faiblement sur les températures du plafond et les températures de l'air de la zone occupée dans

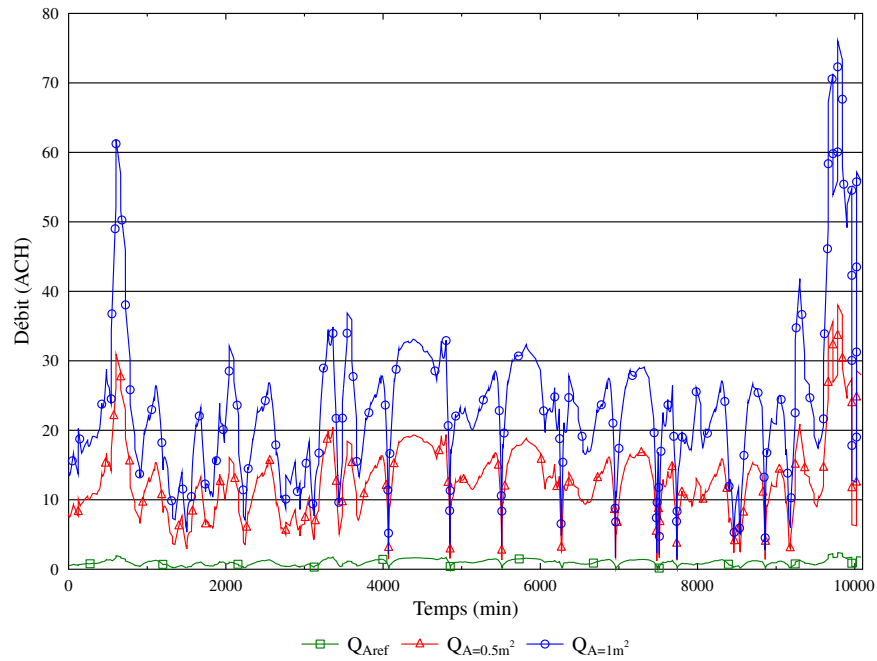


FIGURE 4.17 – Les débits de ventilation estimée pour $h=0,75m$

les bâtiments en évolution libre. La conception du comble et les conditions environnementales pourraient être les raisons de cette faible performance de la ventilation dans les configurations étudiées.

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

4.2.2 Amélioration des performances thermiques des ouvertures

4.2.2.1 Introduction

La littérature rapporte plusieurs cas d'études sur les interactions entre consommation d'énergie, performance de l'éclairage naturel, et conception des ouvertures dans les bâtiments en Europe, en Asie, en Amérique et en Australie. Cependant, peu de travaux traitent du contexte climatique des régions de l'Afrique. Au Nigeria, [Aji-bola \(1997\)](#) a relevé des problèmes dans la conception des fenêtres qui ne répondent pas aux attentes de confort thermique et visuel en taille et en positionnement. Malgré le potentiel de l'éclairage naturel, les niveaux d'éclairement naturel à l'intérieur les bâtiments dans les régions tropicales sont généralement plus faibles que ceux couramment réalisés dans les bâtiments européens et nord-américains ([Edmonds and Greenup, 2002](#)). Les pays en développement étant confrontés à des problèmes tels que la pénurie d'électricité, l'éclairage naturel joue un rôle important dans le bâtiment. La Figure 4.18 montre le potentiel de la part visible du rayonnement solaire pour le cas de Ouagadougou. Dans ce contexte les travaux d'amélioration des performances thermiques des ouvertures doivent prendre en compte l'éclairage naturel.

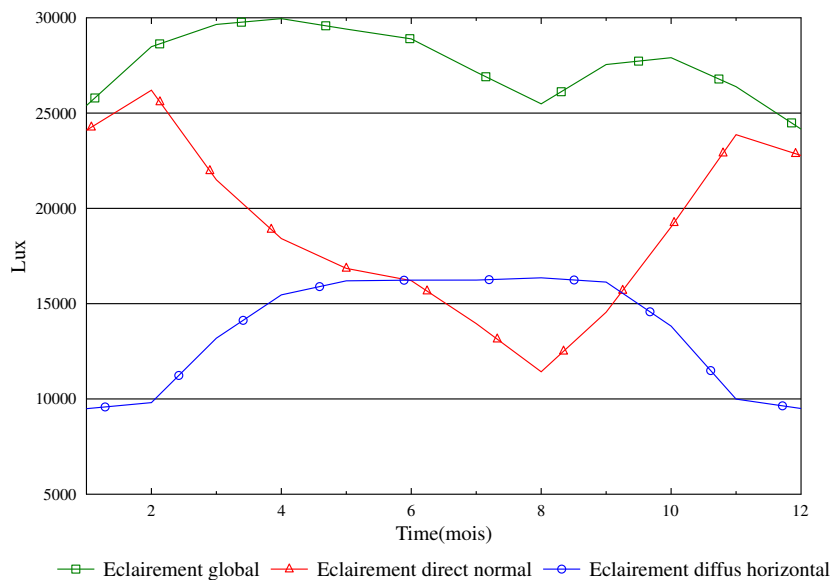


FIGURE 4.18 – Les niveaux de lumière de jour

De nombreux chercheurs ont étudié la part des gains de chaleur causée par les

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

fenêtres. En Italie [Laura Bellia \(2013\)](#) montre que les mesures de contrôle des apports solaires par les ouvertures sont plus efficaces dans les climats chauds. [Lam \(2000\)](#) a constaté que les gains de chaleur à travers les fenêtres d'un immeuble d'habitation de grande hauteur à Hong Kong) représentent 45% de l'énergie nécessaire pour le refroidissement. [Florides et al. \(2000\)](#) quantifie l'impact de la profondeur d'un auvent comme protection solaire sur la demande en énergie. Il montre que la chaleur enlevée par la climatisation diminue au fur et à mesure que la profondeur de l'auvent augmente. [Wong and Li \(2007\)](#) montre que dans la région de Singapour, avec une profondeur de 0,60m, les auvents peuvent conduire à la réduction de l'énergie nécessaire pour le refroidissement de l'ordre de 5.85% à 7.06%. ([Ebrahimpour and Maerefat, 2011](#)) en Iran, a constaté que des auvents ou des flancs au niveau des ouvertures Sud, Ouest et Est permettaient une réduction de l'énergie transférée dans les bâtiments et peuvent avoir des performances équivalentes à celles des vitrages à haute performance.

On observe également que les apports ou les pertes de chaleur dépendent de la taille des fenêtres. [Jaber and Ajib \(2011\)](#) et [Eskin and Turkmen \(2008\)](#) montrent que l'énergie consommée annuellement pour le refroidissement augmente au fur et à mesure que la superficie de l'ouverture augmente. Selon [Yu, Yang, and Tian \(2008\)](#), la consommation annuelle d'électricité diminue de 2,44% avec un WWR de 20% dans un immeuble résidentiel de six étages à Changsha (Chine). La grande majorité de la littérature sur les dispositifs de protection solaire porte principalement sur les stratégies d'amélioration de l'éclairage naturel afin de réduire la consommation d'électricité pour le refroidissement et le chauffage et d'améliorer le confort thermique et visuel dans les ambiances intérieures. Seuls quelques auteurs analysent ces aspects en même temps ([Atzeri, Cappelletti, and Gasparella, 2014](#)). Cela est dû au fait que les outils de simulation ne permettaient pas de simuler ces aspects pour un même environnement de simulation. Cela est en phase d'être résolu avec les environnements modulaires qui intègrent peu à peu des outils spécialisés pour la simulation de l'éclairage naturel. [David et al. \(2011\)](#), évalue l'aspect thermique et visuel et montre que la loggia (auvent et flanc) atténue les apports solaires tout en maintenant un niveau acceptable d'éclairage naturel. [Freewan \(2014\)](#) en Israël, a étudié l'effet de dispositifs de protections solaires sur la température de l'air tout en améliorant le niveau d'éclairement. Les résultats ont montré que la température dans les bureaux équipés de dispositifs de protection solaire était réduite à un niveau acceptable en comparaison au cas sans protection.

Dans la suite de cette partie, les aspects thermiques et visuels du comportement des fenêtres dans un climat tropical chaud à ciel clair seront évalués. L'application d'algorithmes d'optimisation nous permettra de rechercher des solutions optimales.

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

4.2.2.2 Simulation et méthodologie

Selon Wong and Li (2007), il est difficile de mesurer l'effet des différents dispositifs de protection solaire des fenêtres sur le confort thermique intérieur à partir des mesures sur le terrain. Les outils de simulation du bâtiment sont devenus accessibles pour évaluer à la fois les performances énergétiques et les aspects visuels de la conception des bâtiments. Dans cette partie nous avons utilisé EnergyPlus pour l'étude comportement thermique des fenêtres et de l'éclairage naturel. L'indice d'éclairement naturel (UDI) présenté au chapitre 1 sera utilisé pour l'évaluation de l'éclairage naturel. L'indice UDI est exprimé en pourcentage par rapport à la durée annuelle d'ensoleillement. Les données météo utilisées dans cette partie proviennent de base de données meteonorm 7 (2013) où un fichier TMY (Typical Meteorological Year) a été généré. Genopt est utilisé pour les études paramétriques et d'optimisation.

4.2.2.3 Évaluation du cas existant par la simulation

En premier lieu, des études ont été menées sur la fenêtre vitrée d'une pièce conceptuelle. C'est une pièce cubique de dimensions 3x3x3 m avec une ouverture de 1.2x1.2 m placée à 1 m au-dessus du plancher (Figure 4.19). Cette ouverture qui représente un WFR² de 16% est la plus utilisée au Burkina Faso pour les fenêtres vitrées. Le Tableau 4.2 montre les propriétés thermo-physiques du verre clair utilisé dans les simulations. Pour évaluer la partie de la chaleur transmise par la fenêtre dans la pièce, la température est maintenue à 28 °C.

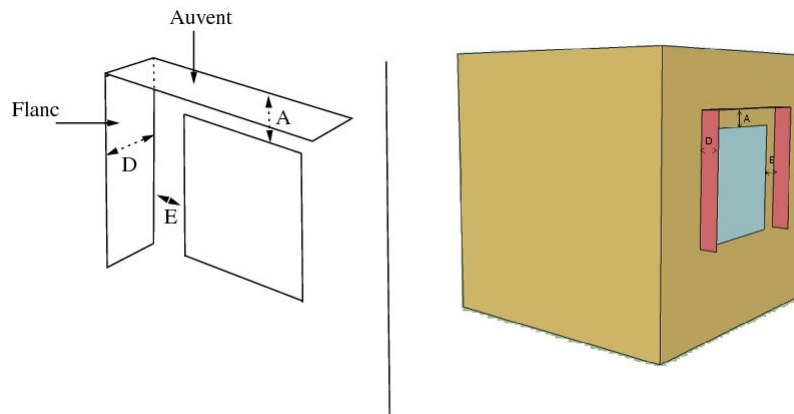


FIGURE 4.19 – Modèle de la pièce

Les UDI et les apports solaires dus à la fenêtre sont simulés. La Figure 4.20 indique la quantité de chaleur transmise annuellement à l'environnement intérieur

2. Window-to Floor-Ratio

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

TABLE 4.2 – Propriétés de verre clair utilisé

	Transmittivité solaire	Réfléctivité Solaire	Transmittivité dans le Visible	Réfléctivité dans le Visible	Emissivité
Simple glass 3 mm	0.837	0.075	0.898	0.081	0.84

par la fenêtre vitrée typique (16 % WFR) sans dispositif de protection. Sur les côtés Est et Ouest, la proportion du rayonnement solaire direct transmise représente 42% des apports solaires totaux dus à la fenêtre. Le reste provient du rayonnement solaire diffus. Pour une fenêtre positionnée au Sud, la proportion de rayonnement solaire direct (40 %) est dans la même gamme que les fenêtres positionnées à l'Est et l'Ouest. Seulement 10% de la chaleur transmise sont dues au rayonnement direct pour une fenêtre positionnée au Nord.

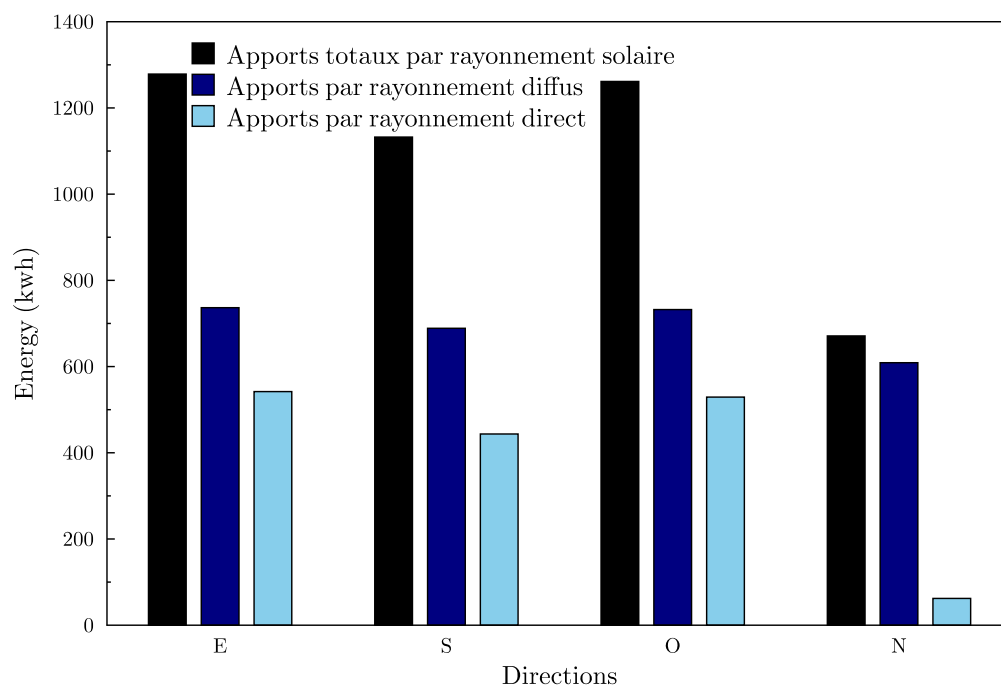


FIGURE 4.20 – Estimation des apports solaires dans le cas de référence

Les Figures 4.23 et 4.22 montrent les UDI des points simulés à différentes distances de la fenêtre de référence et dans les orientations Sud, Est, Ouest et Nord. On peut observer que les UDI qui sont faibles près des fenêtres augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'ouverture. Ceci est dû en grande partie à la

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

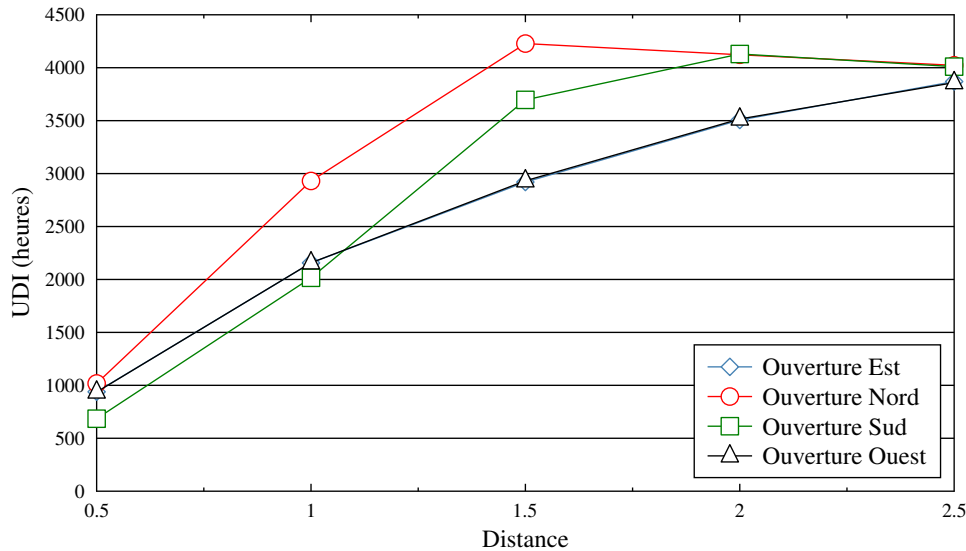


FIGURE 4.21 – Les heures d'éclairement utile simulées pour différents point de la pièce : cas référence

taille de l'ouverture et les faibles UDI près des ouvertures sont dus aux éclairagements supérieurs à 2000 lux. Les heures d'éclairement utiles sont plus élevées autour du milieu de la pièce et diminuent légèrement vers le fond de la pièce pour le cas des ouvertures Sud et Nord (4.21). On note que les UDI sont plus élevées sur les côtés Nord et Sud que sur ceux Est et Ouest. Les directions Est et Ouest sont moins ensoleillées en termes de temps d'irradiation. Ces directions sont ensoleillées respectivement pendant la matinée et l'après-midi. Pendant les heures du lever et du coucher du soleil, les angles solaires sont faibles et la pièce reçoit directement les rayons du soleil à travers les ouvertures Est et Ouest. Pour le reste des heures de la journée, la position du soleil devient élevée avec une position relative au Sud ou au Nord en fonction de la saison.

4.2.2.4 Choix du type de protection solaire fixe par la méthode d'occultation solaire

Divers procédés peuvent être utilisés pour estimer la position du soleil tout au long de l'année. La méthode des angles d'occultation développée par Olgyay et reprise par Givoni est utilisée. Ecotect Autodesk (2011) a été utilisé pour générer la projection stéréographique de la course du soleil. La représentation stéréographique

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

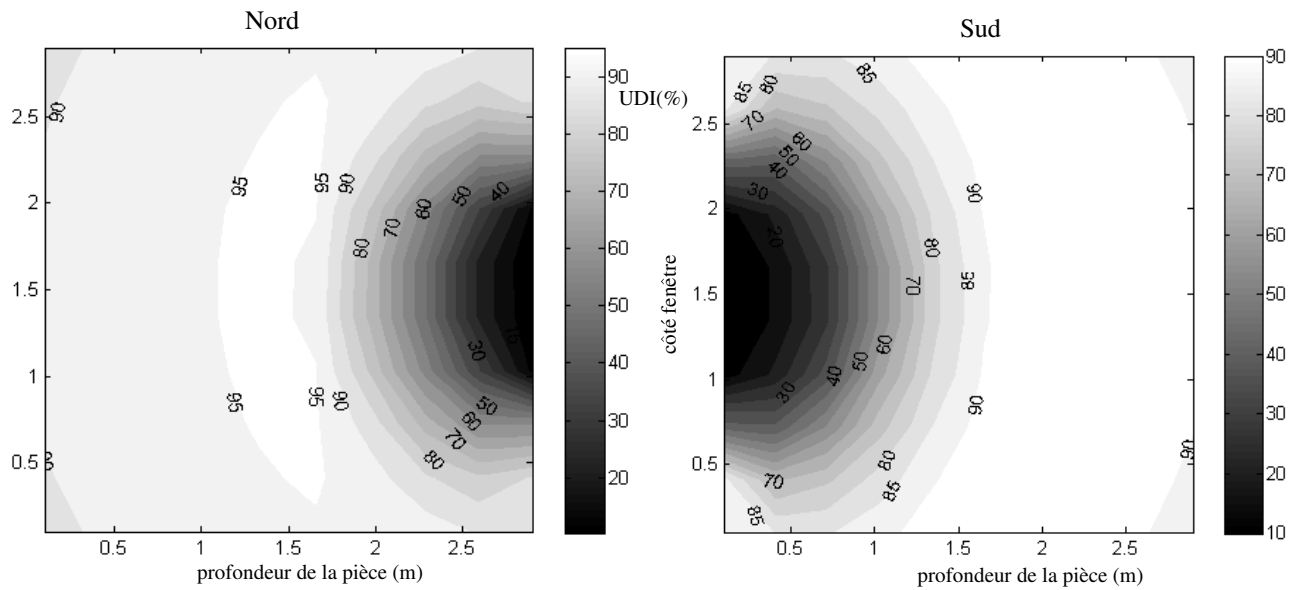


FIGURE 4.22 – Les heures d'éclairage utile simulées dans la pièce : cas référence Nord et Sud

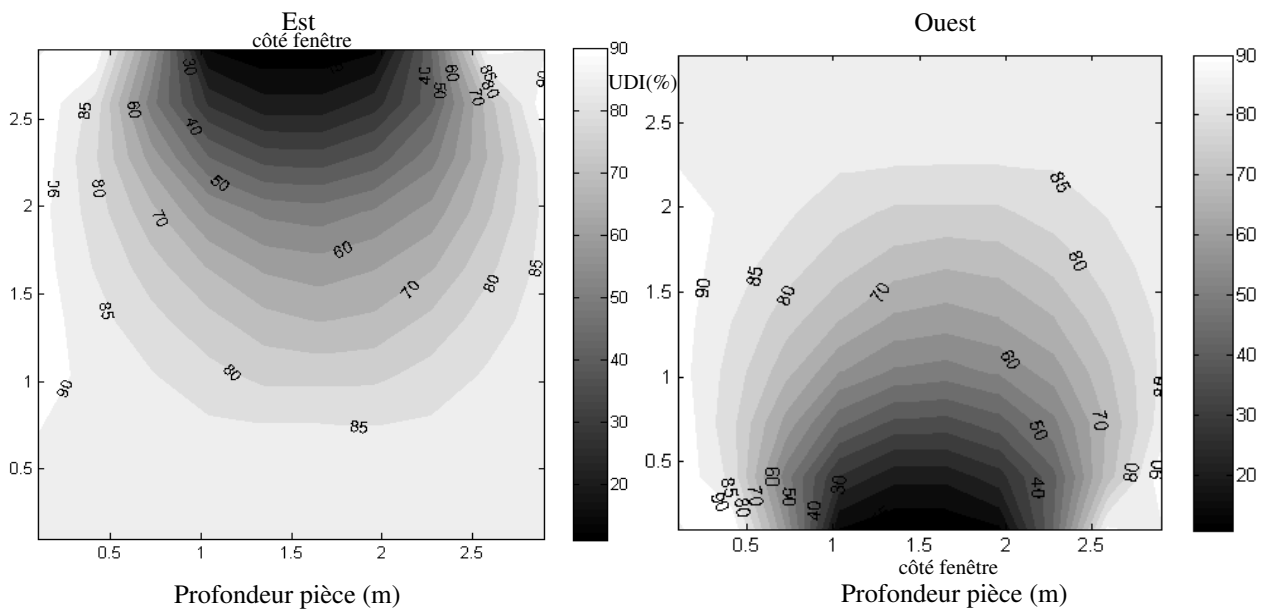


FIGURE 4.23 – Les heures d'éclairage utile simulées dans la pièce : cas référence Est et Ouest

sous la latitude (Figure 4.26) de Ouagadougou montre que la trajectoire du soleil est presque centrée. Les cercles concentriques indiquent les altitudes du soleil. Les

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

graduations en degré indiquent la direction et permettent aussi de repérer la position du soleil. Par conséquent au cours de l'année, toutes les façades d'un bâtiment peuvent être ensoleillées sous cette latitude.

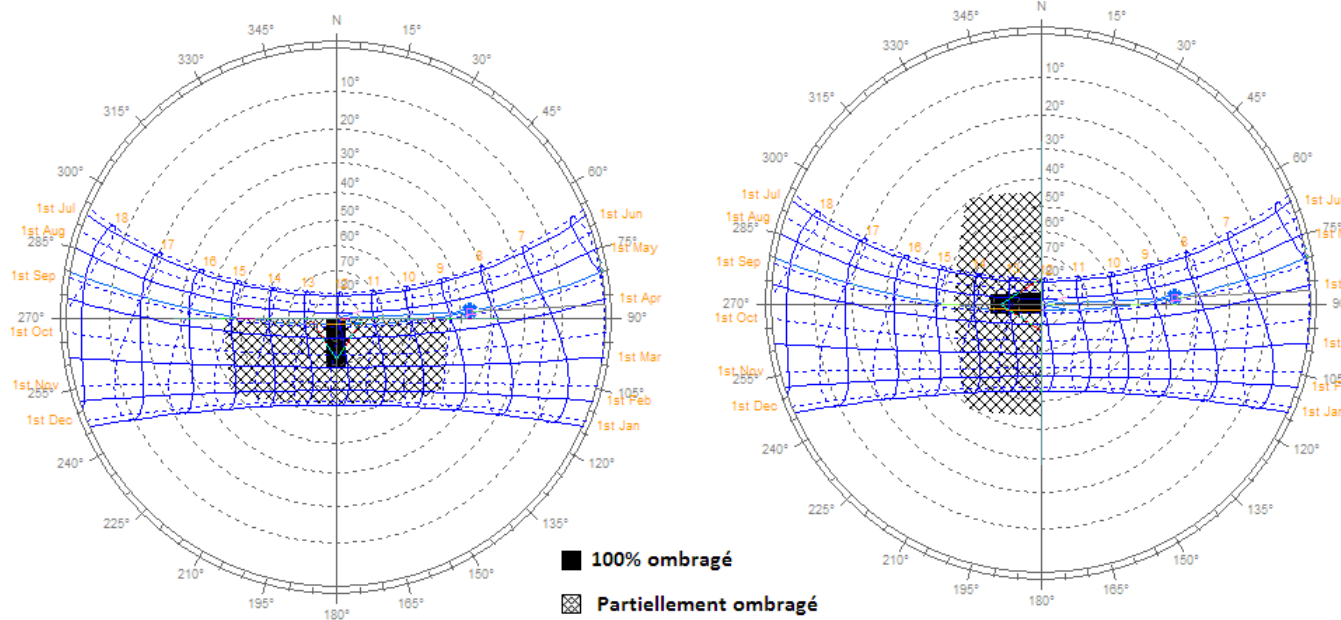


FIGURE 4.24 – Impact d'un auvent de 0.5m de profondeur sur des fenêtres Sud et Ouest

Les Figures 4.24, 4.25 et 4.26 présentent les effets des différentes protections solaires fixes de 0,5m de profondeur. Il s'agit d'un auvent, des flancs, et de la combinaison des deux "la loggia" sur les façades Sud et Ouest.

Les dimensions des protections solaires peuvent être obtenues par la relation entre l'angle d'ombre vertical (VSA) et horizontal (HSA) 4.27. L'angle d'ombre vertical VSA est mesuré dans le plan perpendiculaire à la façade du bâtiment et indique la performance d'un système de protection solaire horizontal. L'angle d'ombre horizontal évalue la performance d'une protection verticale et correspond à la différence entre la position du soleil et l'orientation de la façade considérée.

$$HSA = Azimut - orientation \quad (4.6)$$

$$\tan(VSA) = \frac{\tan(altitude)}{\cos(HSA)} \quad (4.7)$$

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

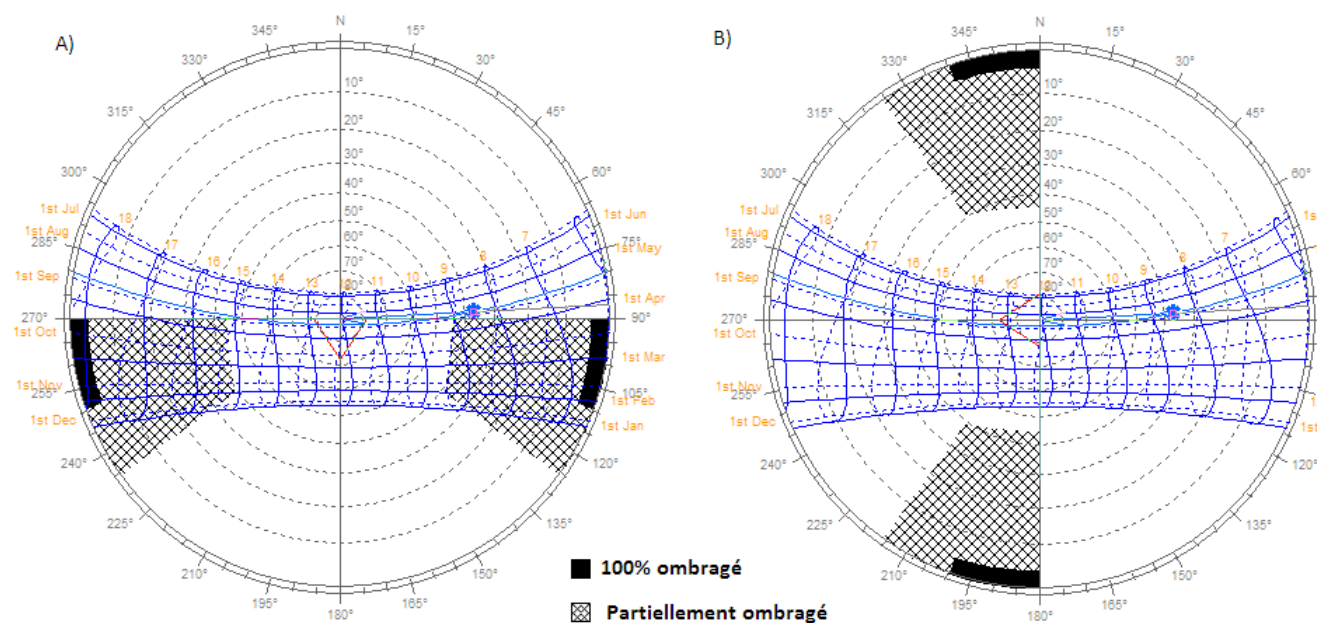


FIGURE 4.25 – Impact d'un flanc de 0,5m de profondeur sur des fenêtres Sud et Ouest

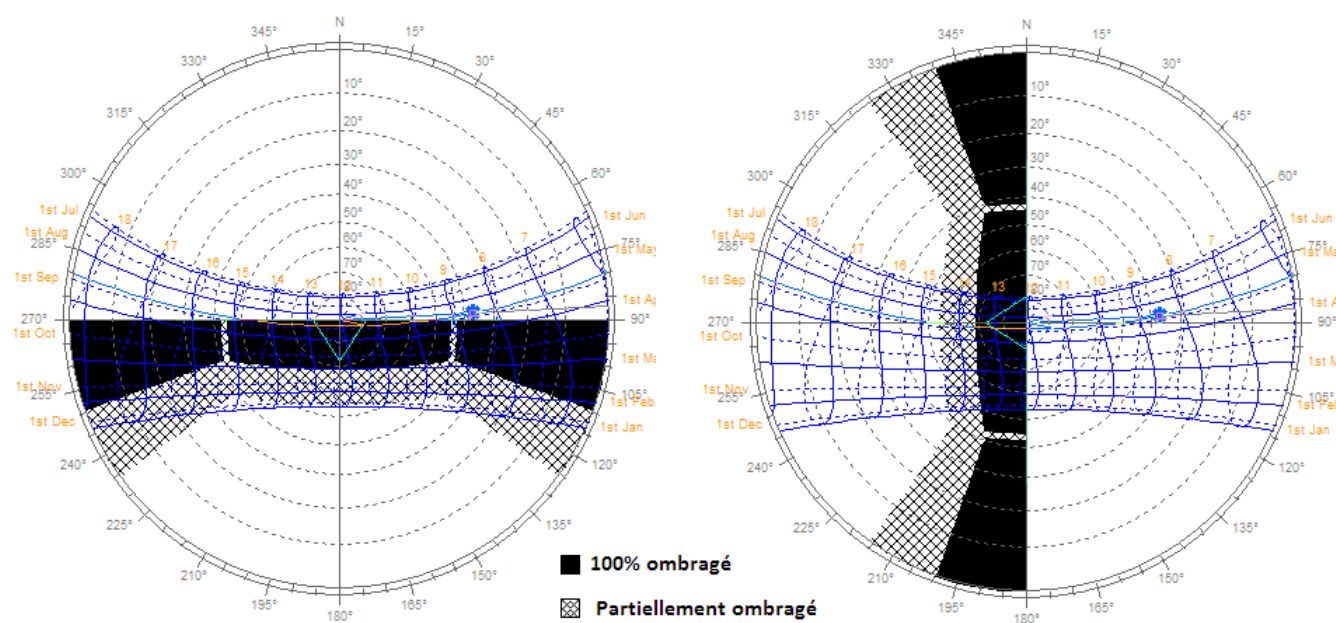


FIGURE 4.26 – Impact d'une loggia de 0,5m de profondeur sur des fenêtres Sud et Ouest

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

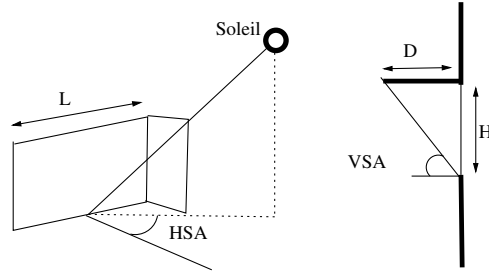


FIGURE 4.27 – Angles d'ombre vertical et horizontal

$$D_{vertical} = \frac{L}{\tan(HSA)} \quad (4.8)$$

$$D_{horizontal} = \frac{H}{\tan(VSA)} \quad (4.9)$$

Une fenêtre au Sud avec un auvent (Figure 4.24) comme protection solaire, est partiellement ombragée la plupart du temps, sauf aux heures de midi. Les effets du flanc sur l'ouverture Sud (Figure 4.25) se produisent pendant les heures de lever et de coucher du soleil. La combinaison de ces deux effets, la loggia (Figure 4.26) peut permettre d'avoir une fenêtre ombragée toute l'année avec une profondeur optimale. Pour une fenêtre sud totalement ombragée, en utilisant les relations entre les angles d'ombres verticaux et horizontaux nous obtenons des profondeurs de 1,45 m et 0,7 m respectivement, pour l'auvent et les flancs composant la loggia. Pour la fenêtre positionnée à l'Ouest, il est difficile d'éviter les rayons directs du soleil sur la fenêtre à certaines périodes de la journée et de l'année avec un auvent, des flancs et une loggia (Figure 4.24, 4.25 et 4.26). Une grande profondeur de loggia sera nécessaire pour mettre la fenêtre entièrement à l'ombre sur les côtés Est et Ouest.

Cette méthode donne des informations utiles, mais ne prend pas en compte le niveau d'éclairage naturel dans le bâtiment. Des protections solaires mal dimensionnées sont moins économiques et peuvent réduire à la fois la vue extérieure à travers la fenêtre et aussi l'éclairage naturel dans le bâtiment. Il est bien connu que la réduction des niveaux d'éclairage naturel peut augmenter l'utilisation de l'éclairage artificiel, ce qui entraînera une hausse des consommations d'énergies. Cependant, cette méthode reste un procédé simple et direct pour avoir une relation entre la course du soleil, les périodes de surchauffes et la nécessité d'une protection solaire. Dans la section suivante des études seront réalisées avec des outils de simulation dynamique pour surmonter les limites de cette méthode. L'objectif est de trouver

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

les dimensions optimales de la loggia pouvant permettre d'éviter les apports solaires par la fenêtre avec des niveaux d'éclairements naturels acceptables.

4.2.2.5 Optimisation des éléments des ouvertures

Afin de réduire la chaleur transmise par les fenêtres, des études ont été menées sur l'optimisation des dimensions d'un dispositif d'ombrage fixe. Les paramètres de la protection solaire sont : la profondeur de la loggia D , l'écart entre la partie supérieure de la fenêtre et l'auvent, A et l'écart E entre le flanc et la fenêtre (voir Figure 4.19). Genopt est couplé au modèle EnergyPlus et l'algorithme GPSHJPSO est utilisé pour la recherche de solution optimale.

$$F_o = Q_w / Q_{wini} + (1 - UDI / H) \quad (4.10)$$

Avec H , le nombre total d'heures où l'éclairement solaire est différent de zéro : 4366 heures dans l'année ; Q , les gains de chaleur dus à la fenêtre par rayonnement direct. UDI , les heures d'éclairement utiles.

La fonction coût F_o prend en compte les apports solaires à travers la fenêtre et la différence entre les UDI et les heures totales d'ensoleillement. Le coefficient calculé E_a représente le quotient du rayonnement solaire direct évité et de l'énergie totale reçue par rayonnement direct par la fenêtre.

4.2.2.5.1 Les impacts de la loggia sur les gains de chaleur

Les paramètres E et A convergent vers zéro pour toutes les directions simulées. Cela signifie que la protection solaire est plus efficace quand elle est proche de la fenêtre. Pour des fenêtres situées à l'Ouest et à l'Est, la profondeur D converge vers des valeurs élevées (1,25m). La totalité du rayonnement solaire direct ne peut être évitée dans ces directions. Cela s'explique par la position du soleil pendant les périodes de lever et de coucher du soleil lorsque l'ensoleillement est perpendiculaire à la surface de la fenêtre.

Pour l'ouverture Sud, une profondeur de 1 m, a été trouvée comme valeur optimale permettant d'éviter le rayonnement direct tout au long de l'année. Une loggia de profondeur $D = 0,4$ m peut protéger une ouverture Nord des rayons directs du soleil. La Figure 4.29 montre l'effet du dispositif de protection sur l'énergie solaire totale (diffus et direct) transférée au bâtiment par la fenêtre. Le rapport de réduction est d'environ 39%, 63%, et 70% pour le Nord, l'Est et l'Ouest, et le Sud, respectivement. Le faible taux de réduction observé pour l'ouverture au Nord peut s'expliquer par le fait que cette direction est la moins ensoleillée. Pour le côté Sud, 70 % du rayonnement est évité avec la loggia. Ceci est cohérent avec les études de [David et al. \(2011\)](#) où les écrans et les volets sont recommandés pour les ouvertures Est et Ouest du bâtiment, si le but est d'éviter tout rayonnement solaire.

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

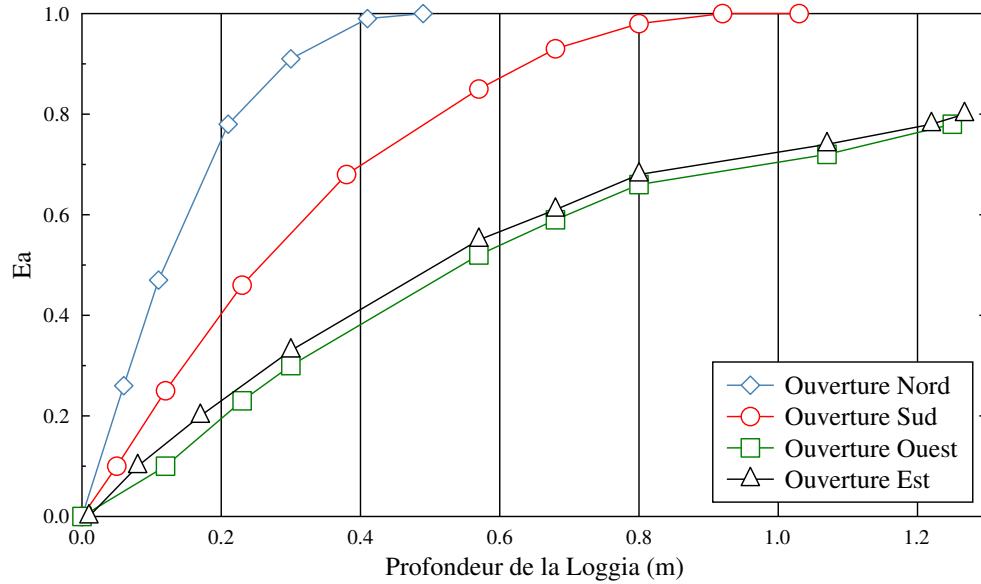


FIGURE 4.28 – Impact de la loggia sur les apports solaires par rayonnement direct

4.2.2.5.2 Les impacts de la loggia sur l'éclairage naturel

En comparant les Figures 4.21, 4.23, 4.22 d'une part et 4.30, 4.31, 4.32 d'autre part, les heures d'éclairement utiles au Sud et au Nord sont en hausse et uniformément réparties. Les surfaces des zones de faible UDI qui existaient près des ouvertures sont réduites.

Pour les points situés avant le milieu de la pièce sur l'axe médian de la pièce on observe des UDI élevées (Figure 4.30). Pour les points situés après le milieu, de légères baisses sont observées. Les zones de faibles UDI se rencontrent dans les coins du mur supportant la fenêtre.

Dans les directions Est et Ouest, on observe l'existence d'une zone où les UDI semblent être uniformes. Les zones de faibles UDI qui étaient dues aux éclairagements supérieurs à 2000 lux tendent à disparaître. La baisse des UDI est plus marquée dans ces directions (Figure 4.31). On peut noter que les UDI de tous les points simulés et pour toutes les directions se trouvent dans une plage plus élevée que pour le cas de référence sans protection solaire. Le dispositif de protection qui abaisse les niveaux d'éclairement permet d'éliminer l'éclairement supérieur à 2000 lux responsable d'éblouissement et d'améliorer l'éclairement utile. Cela justifie la baisse des UDI lorsque les points sont éloignés de l'ouverture. Dans notre cas, le

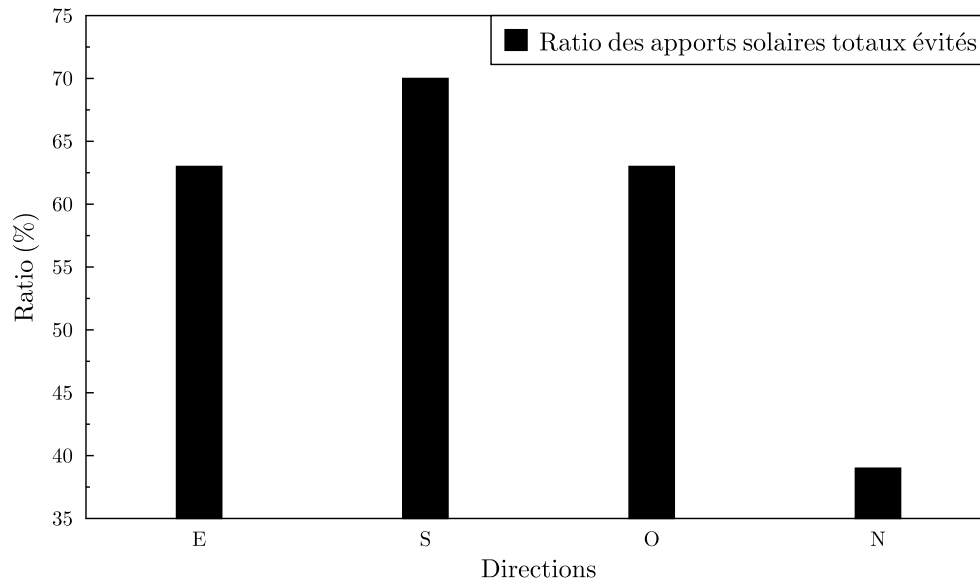


FIGURE 4.29 – Le taux d’apports solaires évités dû à la loggia

point le plus éloigné est à 3 m de l’ouverture et peut expliquer les valeurs assez élevées malgré la régression observée.

4.2.2.5.3 Optimisation des dimensions de la fenêtre et de la loggia

Avec des ouvertures de 16% WFR, un bon compromis a été trouvé entre le niveau de la lumière du jour et protections solaires, mais les apports d’énergie par rayonnement solaire restent élevés pour les fenêtres situées à l’Est, l’Ouest et au Sud. Cela est dû à la part du rayonnement diffus car les protections solaires fixes comme la loggia agissent principalement sur le rayonnement solaire direct et il est difficile d’étudier leur impact sur le rayonnement diffus. Par conséquent, des simulations sont menées pour étudier les impacts des dimensions des fenêtres et celles du dispositif de protection sur l’éclairage naturel et les apports solaires. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.3 et 4.4.

Pour les fenêtres Est et Ouest les WFR trouvés (tableau 4.4), sont respectivement de 5% et 4% contre 6,2% et 5 % pour le Nord et le Sud (Tableau 4.4).

La Figure 4.33 montre les gains de chaleur dus aux fenêtres dans les configurations trouvées pour chaque direction. La proportion due à l’ensoleillement solaire direct est divisé par 10 en comparant les Figures 4.33 et 4.20 à l’Est et à l’Ouest.

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

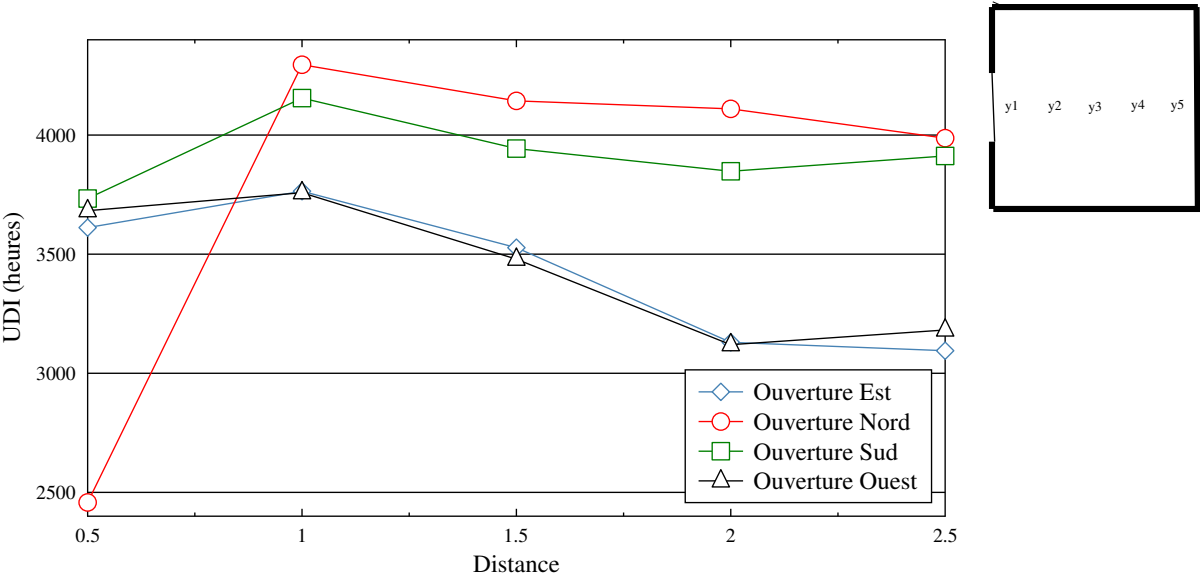


FIGURE 4.30 – Les heures d’éclairement utile simulées sur l’axe médian de la pièce : cas de la loggia

TABLE 4.3 – Optimisation des dimensions de l’ouverture et de la loggia

	WFR (%)	chaleur évitée (%)	profondeur loggia
Sud	4.7	90	0.40
Nord	6.2	80	0.45
Ouest	4.0	89	0.41
Est	4.7	88	0.37

TABLE 4.4 – Les UDI moyens en fonction des cas évalués

	Référence 16% WFR	16% WFR avec Loggia	WFR optimisé avec Loggia
Sud	76.7	83.6	47.2
Nord	82.5	87.4	50
Ouest	73.8	69.3	40
Est	73.8	69.2	46.8

Dans les cas des ouvertures au Sud et au Nord, la part de l’ensoleillement direct tend à disparaître. Les apports solaires totaux annuels dus aux fenêtres sont réduits

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

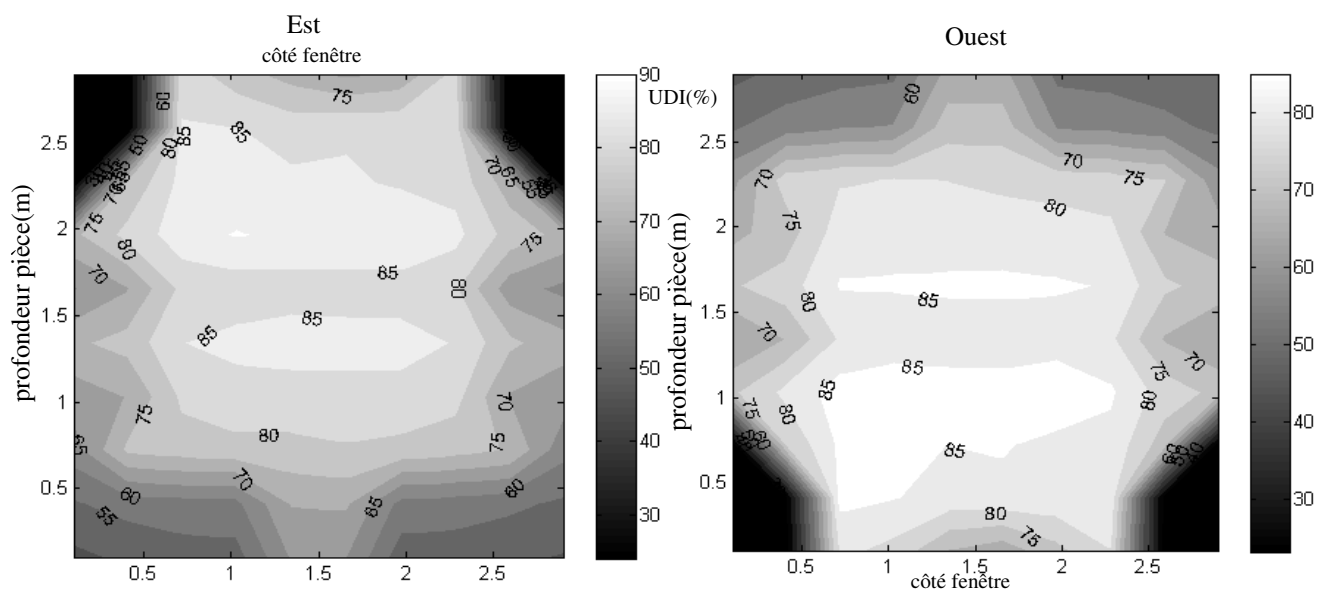


FIGURE 4.31 – Les heures d'éclairage utile simulées dans la pièce : cas de la loggia **Est** et **Ouest**

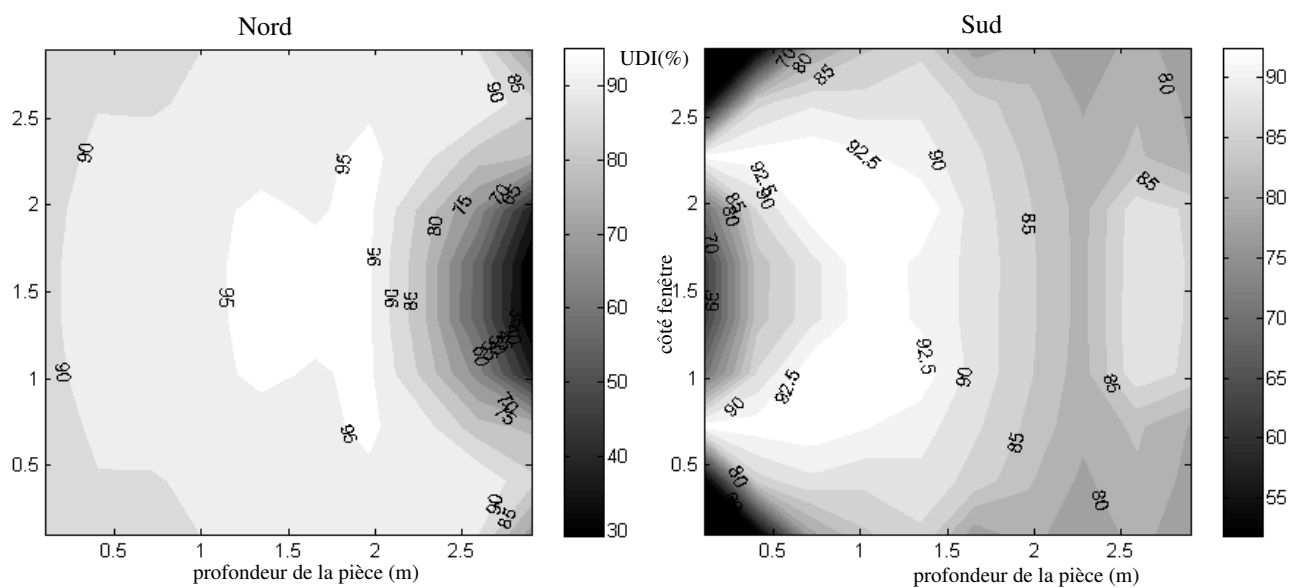


FIGURE 4.32 – Les heures d'éclairage utile simulées dans la pièce : cas loggia optimisée **Nord** et **Sud**

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

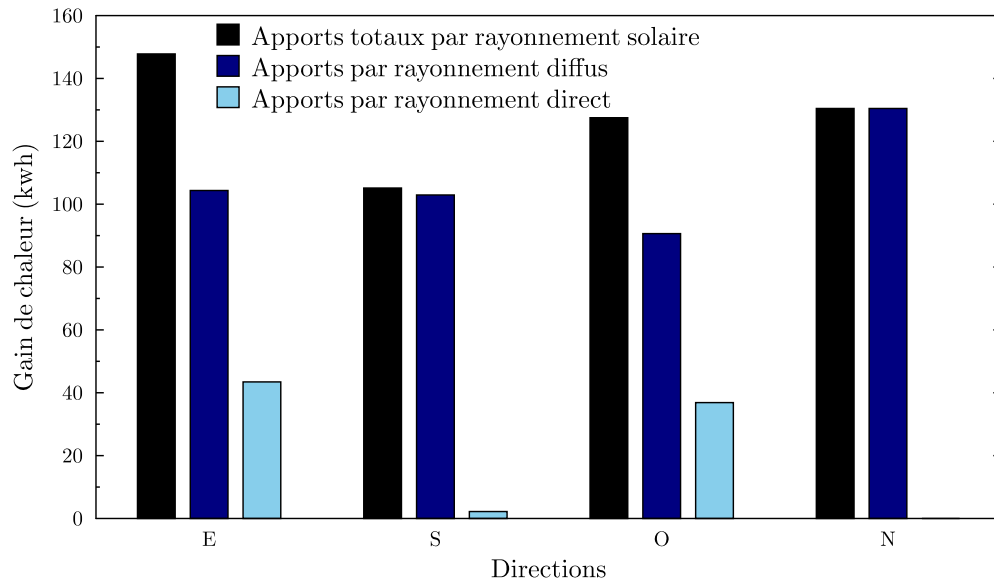


FIGURE 4.33 – Estimation des apports solaires pour le cas des dimensions optimisées

de l'ordre de 80% pour le Nord et de 90% pour les autres directions par rapport au cas de référence (Tableau 4.3).

Dans le tableau 4.3 les profondeurs optimales de loggia sont présentées. En moyenne 0,4 m suffisent pour éviter les parts de rayonnement direct. Sur les Figures 4.34, 4.35 et 4.36, les UDI des nouvelles configurations de fenêtre sont représentées. Dans toutes les directions les zones où les UDI sont inférieures à 50% ont des superficies plus élevées en comparaison aux cas précédents. En réduisant la surface de l'ouverture l'intensité de l'éclairage est diminuée également. Mais autour des fenêtres et au milieu (Figure 4.34) de la pièce des zones d'UDI acceptables sont observées. Les faibles surfaces de fenêtre trouvées par l'algorithme d'optimisation tendent à rejoindre les choix de l'architecture vernaculaire caractérisés par l'absence d'ouverture dans ces régions. Malgré la baisse des UDI on peut observer des régions où les UDI sont supérieures à 50%. Ces régions couvrent plus de la moitié de l'aire de la pièce dans les orientations Nord, Sud et Est. Au-delà des valeurs trouvées, ces résultats démontrent le potentiel de l'éclairage naturel et illustrent les effets du rayonnement solaire sur les parois transparentes dans ces types de climats.

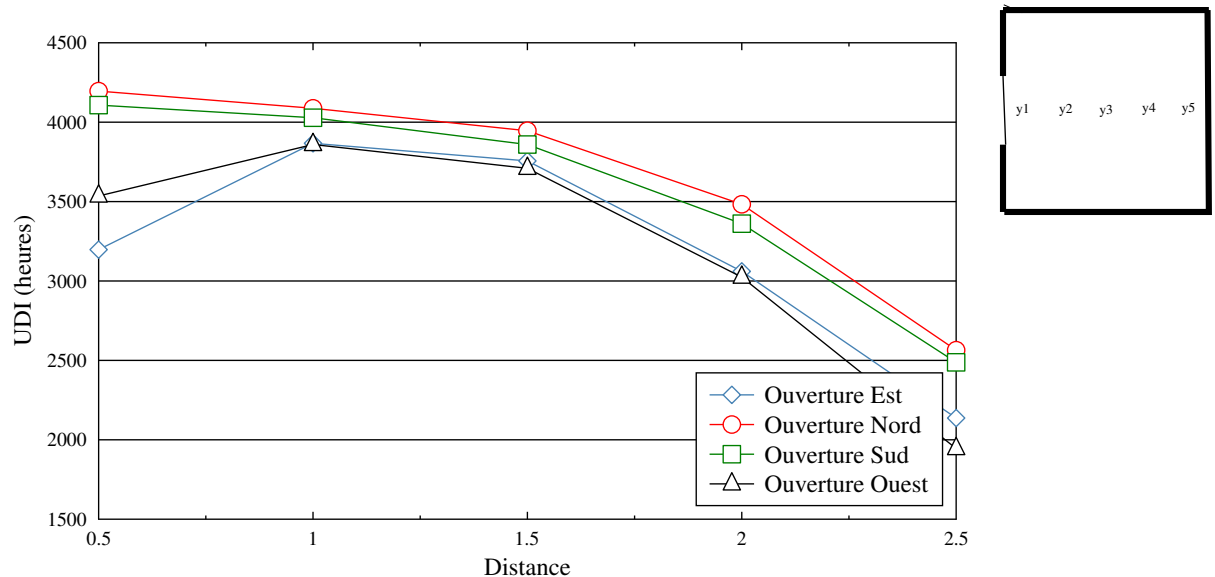


FIGURE 4.34 – Les UDI sur l'axe de l'ouverture : cas d'optimisation

4.2.2.6 Conclusion : performances thermiques des ouvertures

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de cette étude sur les composants transparents du bâtiment. L'optimisation des dispositifs de protection solaire montre que pour les ouvertures de 1,20mx1,20 m au Sud et au Nord munies de loggia, une taille optimale inférieure à 1 m permet d'éviter le rayonnement direct et assurer l'éclairage naturel. Pour les ouvertures à l'Est et à l'Ouest, une loggia de profondeur plus élevée est nécessaire pour éviter l'impact de la lumière directe du soleil. Plus de 60% des apports solaires par la fenêtre peut être évité avec plus d'uniformité de l'éclairage naturel pour les directions Est, Ouest et Sud.

Concernant les dimensions de la fenêtre, cette étude a montré qu'avec un ratio de 5% la fenêtre permet d'avoir un bon niveau sur une bonne partie de la pièce tout en réduisant les apports solaires dans les directions étudiées, sauf pour le Nord où un ratio de 6 % est nécessaire. Ces ratios sont faibles et démontrent le potentiel de l'éclairage naturel.

4.2. Les techniques de refroidissement passif et performances thermiques des ouvertures et de la toiture

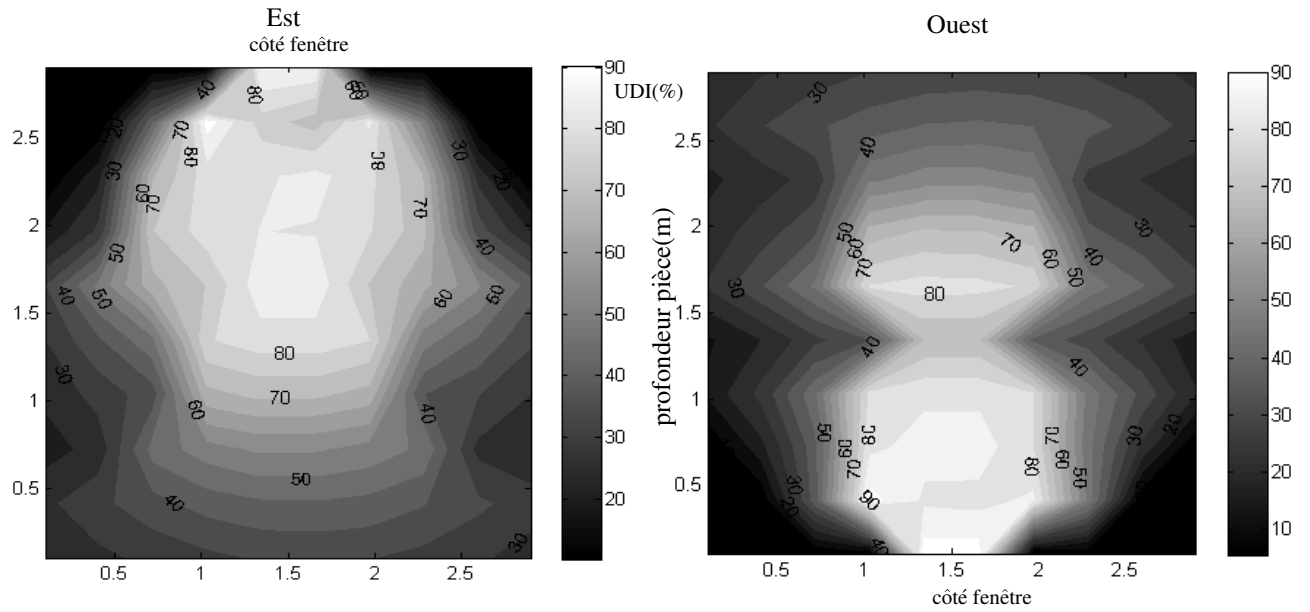


FIGURE 4.35 – Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas WFR **Est** et **Ouest**

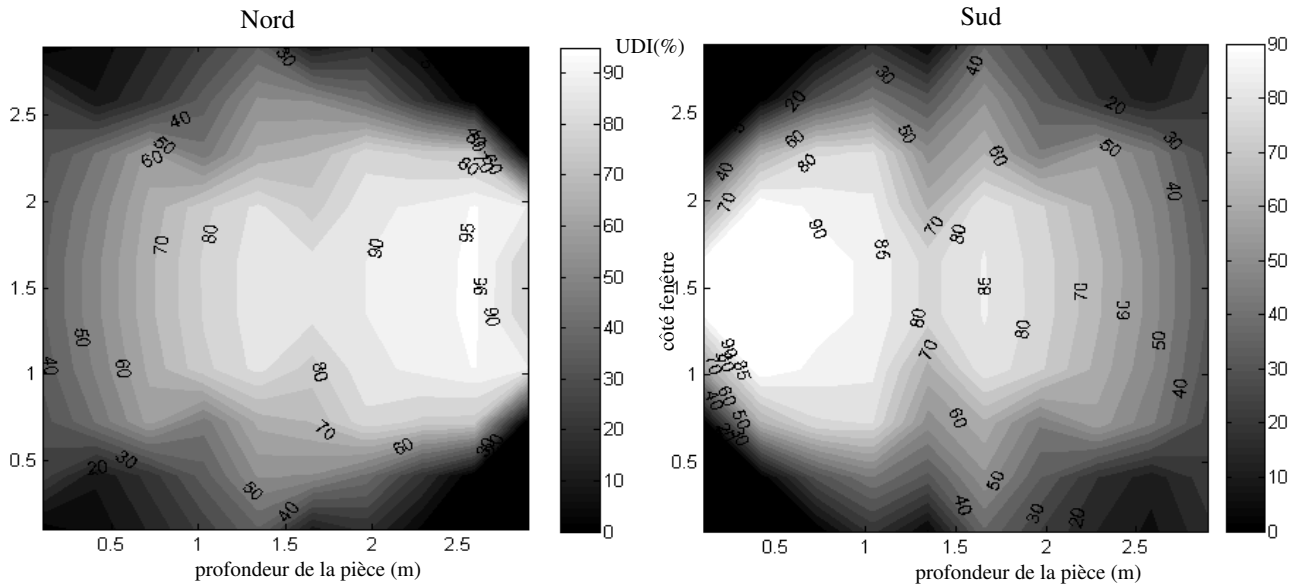


FIGURE 4.36 – Les heures d'éclairement utile simulées dans la pièce : cas WFR **Nord** et **Sud**

4.3 Études comparatives du confort thermique par la simulation

Dans cette section il s'agit d'une étude comparative du confort thermique entre le bâtiment initial et les améliorations développées ci-dessus. La sévérité du climat vis à vis des ambiances intérieures est évaluée. Des analyses de sensibilité sont appliquées à chaque étape mettre en évidence les paramètres influents sur le confort thermique dans les bâtiments. La Table 4.5 présente les différentes configurations apportées au modèle calibré pour mener les simulations. Pour tous ces cas, les mêmes scénarii sont appliqués.

TABLE 4.5 – Les différentes configurations étudiées

Cas	Description
Tôle (référence)	Il s'agit du modèle calibré tel quel
$Tôle + \alpha = 0,25$	Une surface réfléchissante est apposée $\alpha = 0,25$ au niveau de la face externe du toit
$Tôle + comble$	Le comble et ses ouvertures de ventilation sont modélisés et intégrés au modèle calibré
$Tôle + comble + \alpha = 0,25$	Le modèle $Tôle + comble$ avec une surface réfléchissante au niveau du toit
Tôle+ comble+ $\alpha = 0,25$+ 16%WFR	cas $Tôle + comble + \alpha = 0,25$ mais les jalousies au niveau des fenêtres sont remplacées par des baies vitrées 16%WFR
$Tôle + comble + \alpha = 0,25 + WFR_{opt}$	cas $Tôle + comble + \alpha = 0,25$ mais les jalousies au niveau des fenêtres sont remplacées par des baies vitrées de ratio optimisé en fonction de l'orientation des fenêtres

4.3.1 Impact des surfaces réfléchissantes sur le confort thermique

Comme spécifié plus haut dans ce document, les apports solaires sont très importants dans les bâtiments en évolution libre. Les solutions d'amélioration des toitures

4.3. Études comparatives du confort thermique par la simulation

et des ouvertures définies sont utilisées dans cette partie dans le but d'étudier les effets sur le confort thermique proprement dit à titre de comparaison.

4.3.1.1 La configuration du toit simple

L'effet d'une surface réfléchissante est pris en compte. Le pigment rouge de la tôle du bâtiment expérimental est remplacé par un pigment ayant un coefficient d'absorptivité solaire de 0,25 (couleur blanche référencée par "WP") dans le modèle. Comme spécifié sur la Table 4.5 l'ouverture se compose d'une jalousie et sans vitrage. Les effets de cette configuration sur le confort thermique sont présentés à la Figure 4.37. Une diminution des températures maximales est observée. Les heures d'occupation qui sont dans la plage des 90% d'acceptabilité représentent 36,23%. En intégrant les limites de 80% de satisfaction, 49,81% des heures totales d'occupations sont dans le confort thermique. Avec une surface plus réfléchissante la température de la toiture diminue pendant les heures d'ensoleillement. Cela induit une baisse de la température opérative dans la zone. L'amélioration au niveau de confort thermique est d'environ 15%, en comparaison au cas du toit simple.

4.3.1.2 La configuration du comble

Le cas du comble est évalué par l'ASHRAE 55 sur la Figure 4.38. Les proportions des trois limites sont de 20,91%, 32,4% et 67,6% respectivement pour les limites d'acceptabilité de 90%, 80% et la zone d'inconfort. Les effets d'une surface réfléchissante ($\alpha = 0,25$) dans ce cas, sont montrés à la Figure 4.39. Les heures d'occupation se trouvant dans la limite du confort thermique sont de 26,26% et 38,66% respectivement pour les plages de 90 et 80% d'acceptabilité. 61,34 % des heures d'occupation se trouvent hors des limites du confort thermique.

En comparant les deux cas on observe une amélioration d'environ 6% sur les heures d'inconfort avec l'application d'une couche de faible absorptivité solaire au niveau de la face externe du toit.

La comparaison des différents cas de toiture (Table 4.40) est à l'avantage de la toiture simple. Avec les deux configurations de toiture avec comble, on observe une diminution des températures pendant les heures diurnes mais celles-ci restent en grande majorité hors des limites du confort thermique. A cela on peut ajouter les heures d'inconfort thermique pendant les heures nocturnes dues à la diminution de l'impact du refroidissement du toit sur la zone occupée. Le comble dans un bâtiment en évolution libre contribue à atténuer les grandes variations de température et diminue le stress thermique subi par les occupants pendant la période diurne. Cela est intéressant pour des bâtiments exploités principalement en journée et se traduira par une baisse des consommations d'énergie dans le cas d'un refroidissement actif par conditionnement d'air.

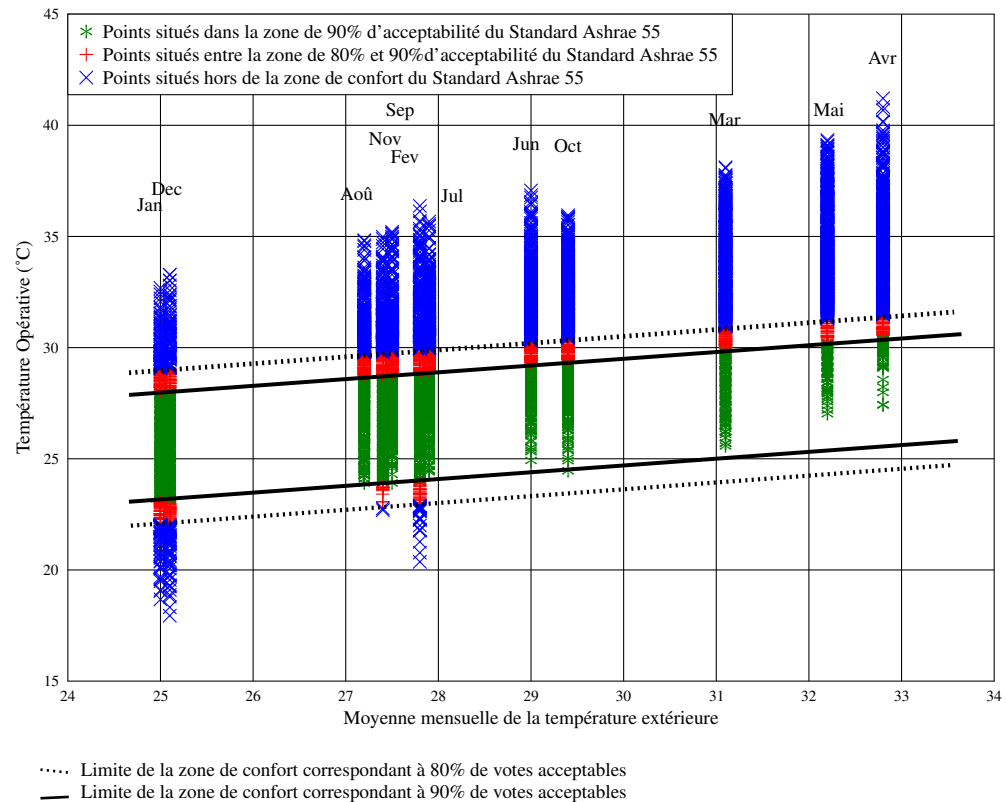


FIGURE 4.37 – Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : Tôle + $\alpha = 0,25$

4.3.2 Amélioration du confort thermique par les ouvertures

4.3.2.1 Impact des ouvertures sur le confort thermique dans les bâtiments en évolution libre

Au modèle du bâtiment dans le cas du comble avec une couche réfléchissante, une fenêtre composée d'un vitrage claire de 6mm (voir Table 4.2) est modélisée en remplacement de la jalousie afin d'évaluer l'impact du vitrage sur la zone occupée.

La répartition des températures opératives pour le cas de la fenêtre 1,2mx1,2m est représentée dans la Figure 4.41. On observe une légère augmentation de la température lorsque la jalousie est remplacée par la vitre claire. Les investigations sont menées avec le modèle "comble + WP" mais, les caractéristiques du confort tendent à se rapprocher de celles du cas "Tôle + comble" (Figure 4.40 et Table 4.6).

4.3. Études comparatives du confort thermique par la simulation

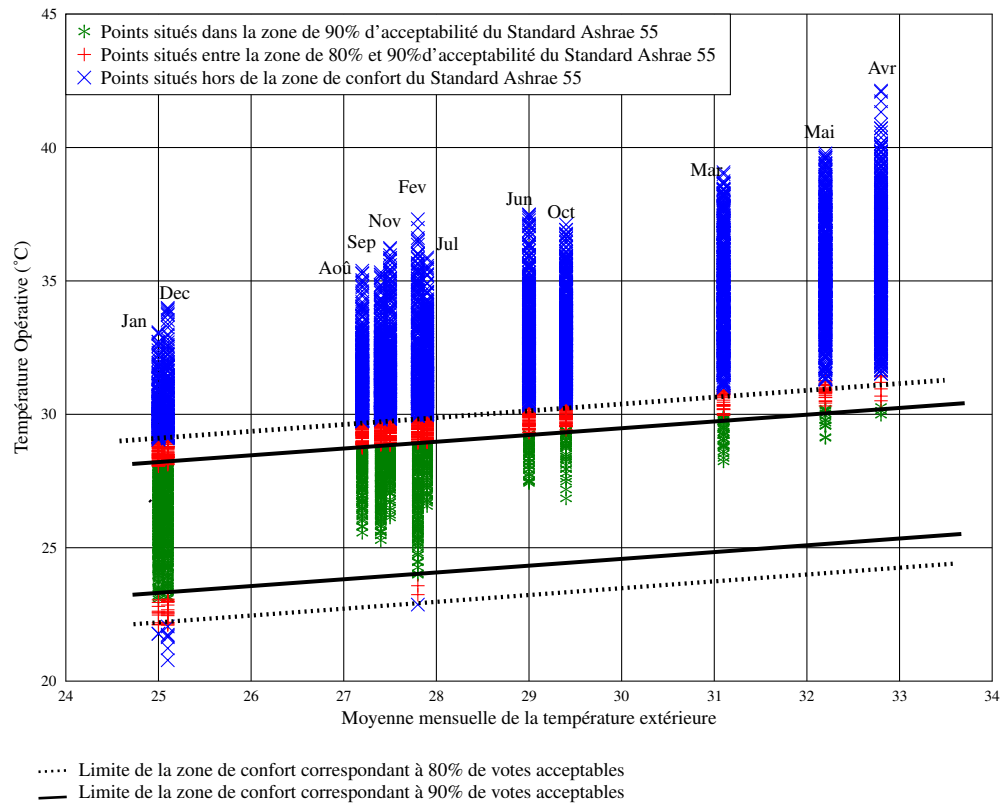


FIGURE 4.38 – Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : *Tôle + comble*

La Figure 4.42 présente la répartition des températures opératives pendant les heures d'occupation lorsque l'on applique les fenêtres de ratio WFR optimisé. On observe des améliorations sur les besoins en refroidissement en comparaison au cas de la fenêtre vitrée conventionnelle (Table 4.6). Les heures d'inconfort sont de l'ordre de 62% contre 67.6% pour le cas de l'ouverture conventionnelle.

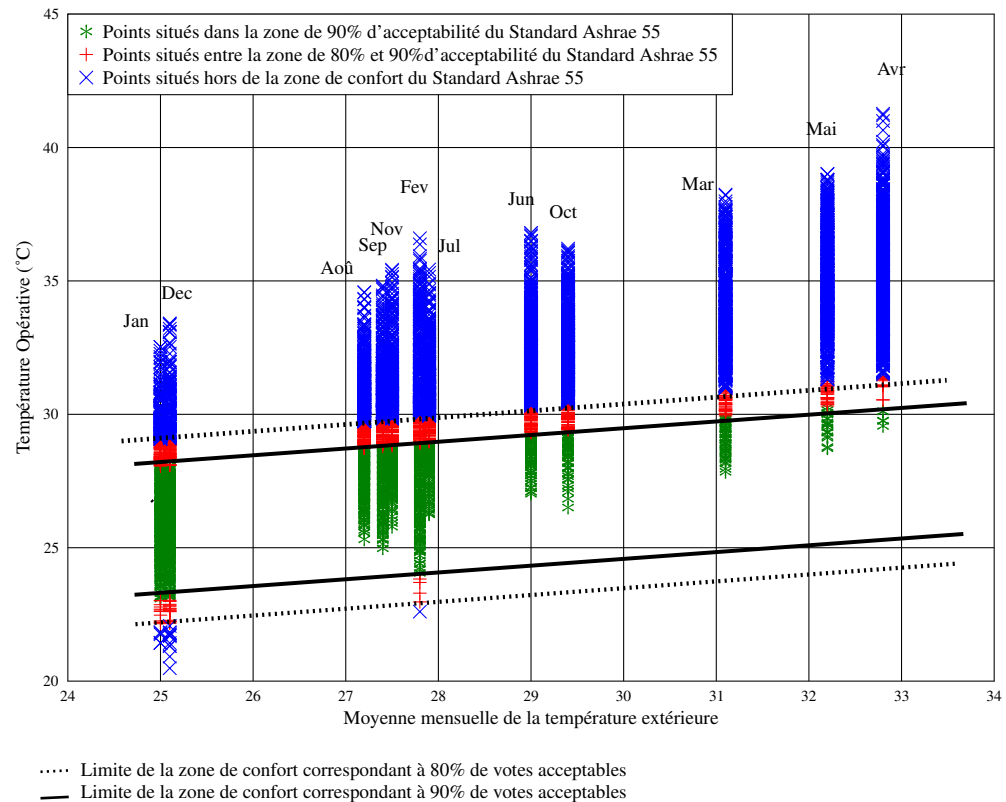


FIGURE 4.39 – Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : $T_{\text{tôle}} + \text{comble} + \alpha = 0,25$

4.3.2.2 Les effets des ouvertures sur la consommation d'énergie dans les ambiances contrôlées

4.3.2.2.1 L'impact sur la consommation d'énergie pour le refroidissement

Pour mieux observer les effets des ouvertures sur le bâtiment, les besoins en énergie pour le refroidissement sont simulés pour un cas de climatisation et comparés. Pour une température de consigne de 28°C, la Table 4.7 montre les taux de réduction de l'énergie à extraire pour le refroidissement quand on compare à la configuration "tôle+comble" (Table 4.40). En réduisant la surface des baies vitrées, la baisse des charges thermique est évidente. Une réduction de 22.5% est observée pour les fenêtres de WFR optimisé par rapport au cas "Tôle+ comble". La combi-

4.3. Études comparatives du confort thermique par la simulation

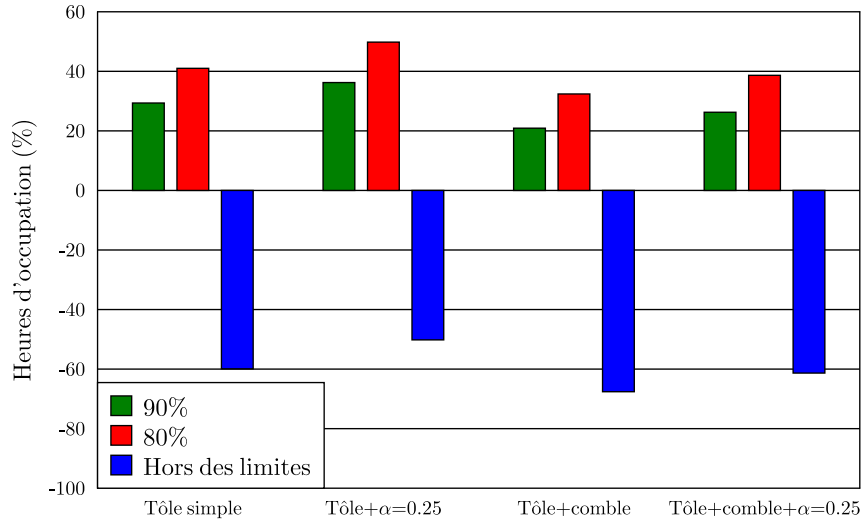


FIGURE 4.40 – Comparaison des différents cas de toiture

TABLE 4.6 – Impact de la taille des ouvertures sur le confort thermique

Confort thermique	16% WFR	WFR_{opt}
90%	20,77	22,77
80%	32,4	37,72
Hors des limites	67,6	62,28

raison de l'effet d'un toit réfléchissant et le WFR optimisé induit une réduction de 32.5% par rapport au cas de référence. On peut noter au passage la réduction de 23% des charges thermiques induite par l'application de la surface réfléchissante.

4.3.2.2.2 Analyse de sensibilité locale : ambiance contrôlée

La climatisation est prise en compte dans cette partie. La capacité de l'enveloppe à réduire les consommations d'énergie est examinée dans le cas d'une ambiance contrôlée. A cette fin, le comble et les fenêtres vitrées sont utilisés avec le modèle calibré pour les investigations. Une analyse de sensibilité locale est appliquée sur les paramètres de l'enveloppe. Ces paramètres sont les mêmes que ceux de l'étude paramétrique précédente pour les bâtiments en évolution libre à l'exception du débit de ventilation. Le paramètre observé est l'énergie extraite de la zone pour atteindre la consigne de température. Les résultats sont résumés sur la Figure 4.43.

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

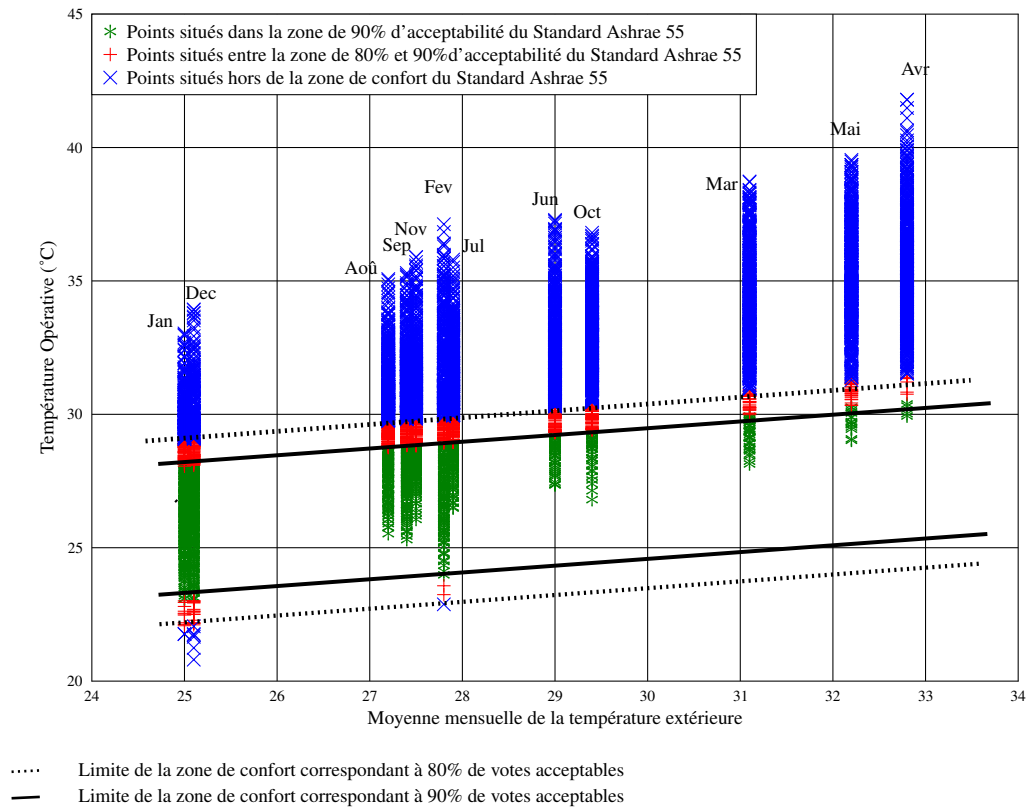


FIGURE 4.41 – Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : l'ouverture vitrée 1,2mx1,2m

Les observations sur l'importance des propriétés de surface lors de l'étude de sensibilité précédente sont valables pour ce cas. La présence du comble diminue l'indice de sensibilité des propriétés de surface du toit. L'émissivité de la paroi interne du toit devient plus importante que dans l'étude paramétrique précédente car elle influe directement sur la température du faux plafond qui est en contact avec la zone contrôlée.

Les indices des propriétés thermo-physiques du toit restent négligeables. Pour les parois verticales, les indices les plus élevés sont obtenus par l'émissivité et l'absorptivité solaire des faces extérieures. La tendance est à l'augmentation de la masse volumique, la chaleur spécifique et l'épaisseur des éléments de maçonnerie pour réduire les besoins en énergie pour le refroidissement. Par contre, au niveau de la conductivité thermique de la maçonnerie des valeurs plus faibles sont recom-

4.3. Études comparatives du confort thermique par la simulation

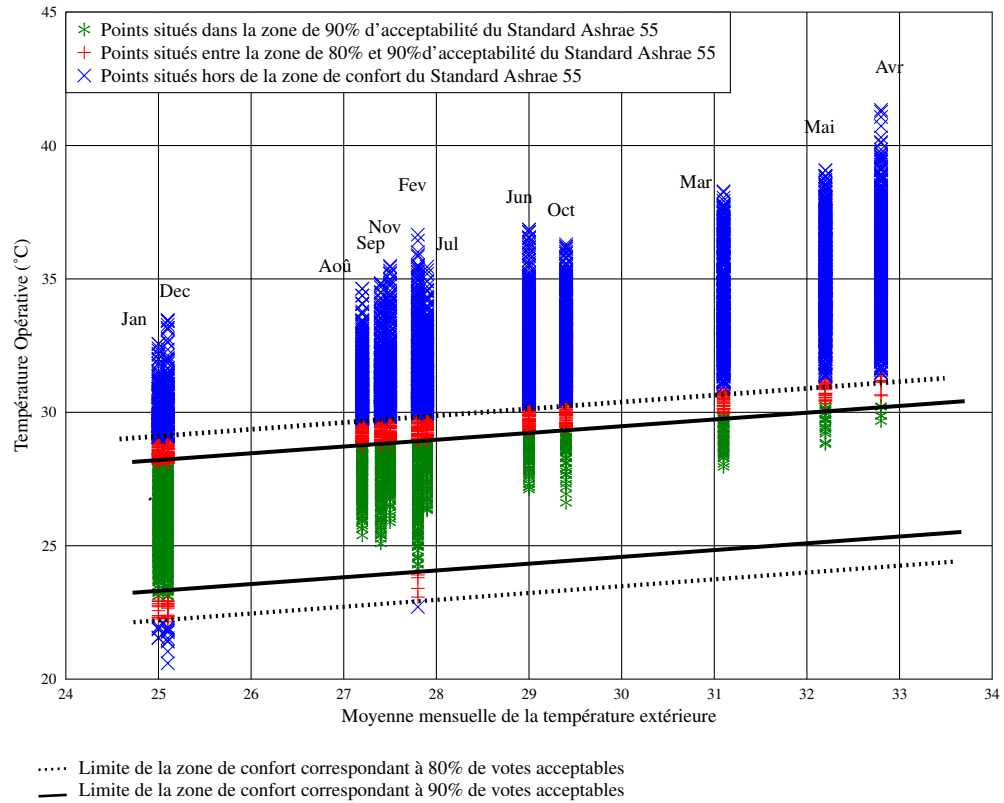


FIGURE 4.42 – Évaluation du confort thermique par le standard ASHRAE 55 dans la configuration : des dimensions optimisées

mandées. Ces variations des propriétés thermo-physiques induisent une diminution de la diffusivité thermique et l'augmentation de la capacité de stockage des éléments utilisés. En comparant le cas de l'évolution libre à celui de l'environnement contrôlé, il ressort que dans ce dernier cas l'inertie est recommandée alors que ce sont des structures légères dans l'autre cas. Dans les deux cas, les propriétés de surface ont plus d'impact sur le confort. Les interventions pour l'amélioration de l'environnement intérieur des bâtiments contrôlés aussi bien que ceux en évolution libre doivent être tournés dans un premier temps vers l'amélioration des propriétés de surface des matériaux.

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

TABLE 4.7 – Réduction de l'énergie à extraire pour le refroidissement par rapport au cas de référence du comble

	<i>Comble + WFR_{opt}</i>	<i>Comble + WP + 16%WFR</i>	<i>Comble + WP + WFR_{opt}</i>
Taux de réduction (cas du comble)	22,49	23,08	32,45

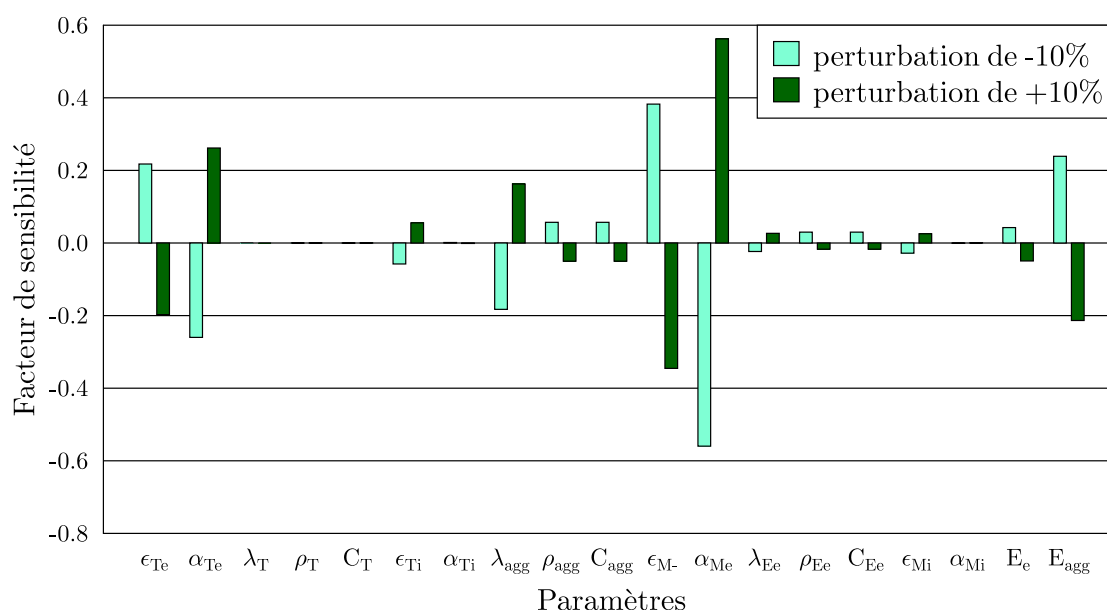


FIGURE 4.43 – Sensibilité des paramètres de l'enveloppe dans le cas d'une ambiance contrôlée

4.3.3 Comparaison des différentes configurations et analyse des heures d'inconfort

Les sévérités du climat dans les bâtiments en évolution libre sont caractérisées dans cette partie. Comme évoqué au Chapitre 1, nous utiliserons la méthode des températures d'évolution libre de Ghiaus and Allard (2006). Cette méthode est utilisée pour caractériser les besoins en refroidissement pendant les heures d'inconfort. Nous nous proposons ici de caractériser les performances des différentes configurations de bâtiment au moyen de cette méthode. Dans notre étude les températures, compte tenu du manque de norme adaptative spécifique à la région étudiée, le standard de confort adaptatif de l'ASHRAE a été adopté comme base pour estimer les

4.3. Études comparatives du confort thermique par la simulation

degrés-heures.

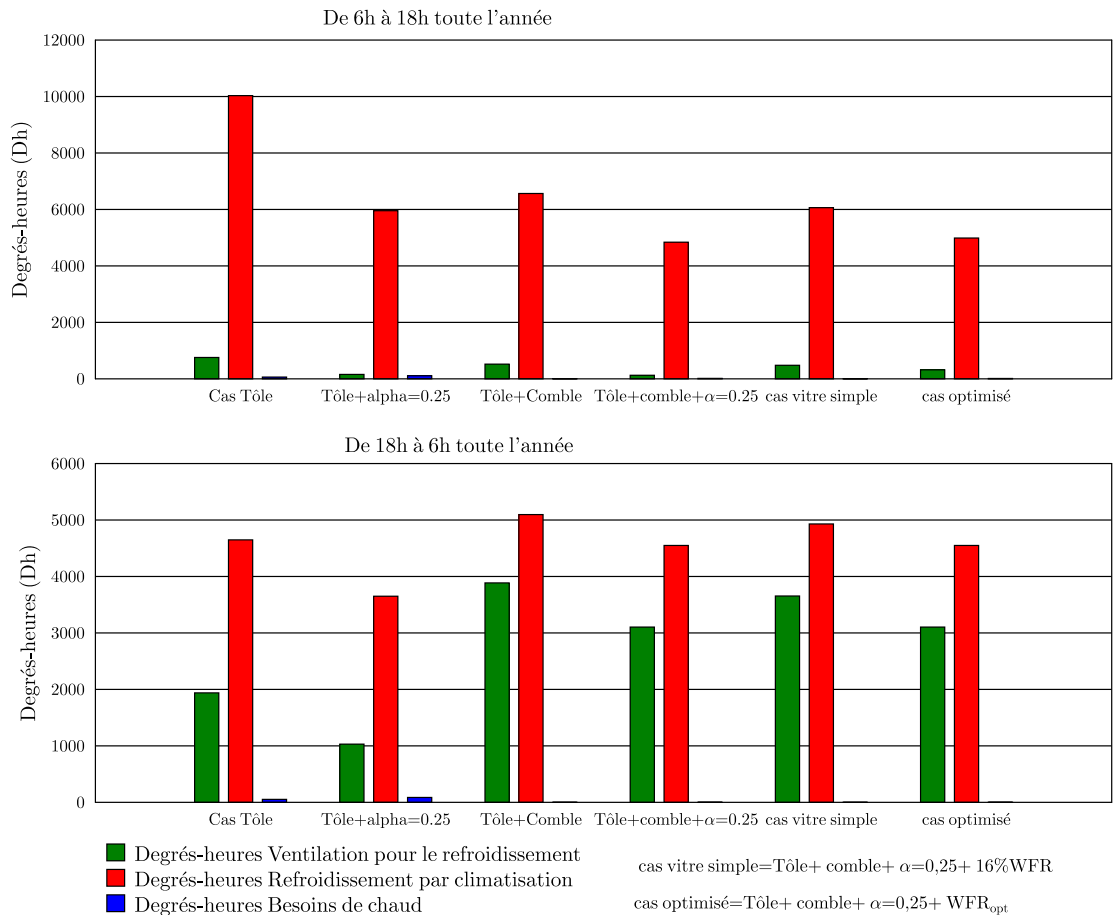


FIGURE 4.44 – Caractérisation des heures d'inconfort pour le jour et la nuit

Les Figures 4.44 et 4.45 présentent l'analyse des heures d'inconfort à travers l'estimation des degrés-heures. Sur ces graphiques le potentiel de refroidissement par ventilation de l'air extérieur ainsi que les heures pendant lesquelles d'autres moyens de refroidissement doivent être envisagés sont aussi représentés. Il faut noter que la ventilation estimée ici est celle qui permet de refroidir le bâtiment donc de faire l'économie d'une éventuelle climatisation artificielle. La ventilation pour le confort n'est pas évaluée ici car il faut des expérimentations supplémentaires pour caractériser le comportement des bâtiments face au vent dans notre contexte climatique. Ce que nous entendons par le terme refroidissement par climatisation intègre à la fois le refroidissement par évaporation et par climatisation artificiel. Les différentes configurations du bâtiment sont évaluées.

Chapitre 4. Développement de techniques de refroidissement passif et stratégies de réduction de l'inconfort thermique

On observe la même tendance en journée pour toutes les configurations étudiées. Le potentiel de refroidissement par ventilation pendant les heures diurnes est très faible (Figure 4.44) par rapport aux heures nocturnes. Dans le cas de la configuration *Tôle + comble*, le potentiel de la ventilation augmente d'un facteur 5 en comparant la période nocturne à la période diurne.

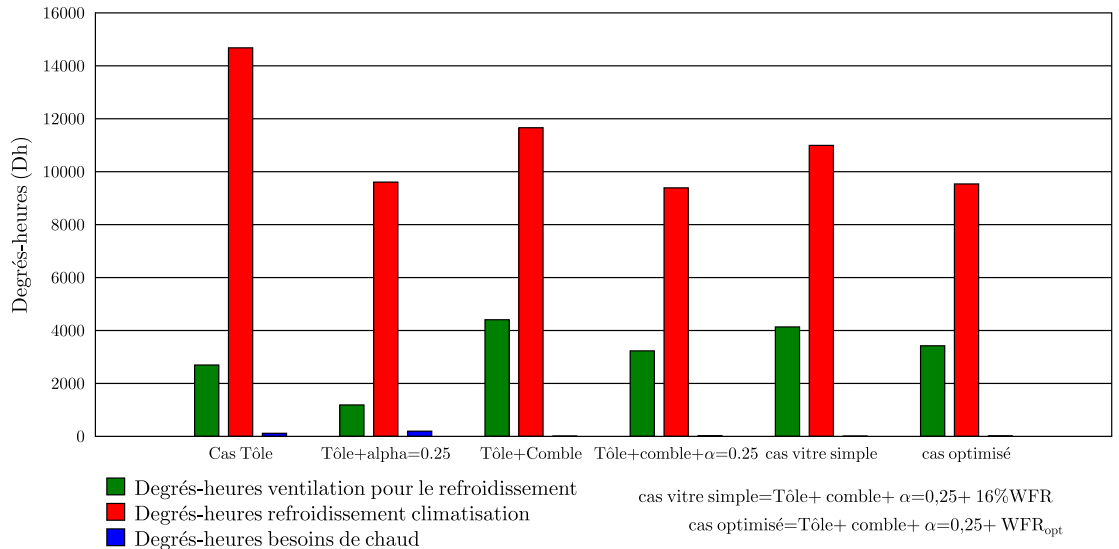


FIGURE 4.45 – Caractérisation des heures d'inconfort pour l'année

Ainsi, la présence du comble augmente les besoins de ventilation pour le confort tout en réduisant les heures de climatisation en journée. Les surfaces réfléchissantes en réduisant les pics de températures entraînent une baisse des heures où l'on a recours aux autres solutions de refroidissement ainsi que celles de la ventilation pour le refroidissement. Durant les heures nocturnes, c'est dans les configurations de faibles réflectivité du toit que les degrés-heures pour le refroidissement et la ventilation sont les plus faibles. La surface réfléchissante diminue les besoins en refroidissement. En journée compte tenu des températures moins élevées dans cette configuration, le besoin en ventilation est très faible. Bien entendu la réduction des surfaces des baies vitrées (cas optimisé Figure 4.45 et 4.44) contribue à réduire la période de climatisation. Pour le cas de la tôle simple, les besoins en chauffage apparaissent. On remarque que ces besoins de chaud disparaissent avec le comble. Ces besoins sont négligeables et peuvent être surmontés par l'habillement. En comparant tous les cas simulés sur une année, on peut observer que les configurations intéressantes sont les cas "*Tôle + $\alpha = 0,25$* " "*Tôle + comble + $\alpha = 0,25$* " et "*Tôle+combe+ $\alpha = 0,25$ +WFR_{opt}*". Ces deux configurations ont de faibles degrés-

4.4. Conclusion

heures en refroidissement avec un potentiel en ventilation intéressantes. L'ampleur des besoins en refroidissement souligne les limites de ce bâtiment type étudié qui est construit en matériaux conventionnels.

4.4 Conclusion

Parmi les matériaux et les techniques de construction modernes adoptées par les pays en développement de l'Afrique sub-saharienne, les toitures métalliques sont de loin les plus répandues. Ce matériau est responsable d'une grande partie des gains de chaleur dans le bâtiment. Des études comparatives ont été réalisées sur des solutions passives dans le but d'améliorer les performances thermiques. Les fenêtres et les matériaux transparents sont des composants de l'enveloppe qui ont été introduits et doivent être traités avec une grande attention dans les climats chauds de l'Afrique sub-saharienne et ceux de basses altitudes en particuliers. Les études sur les fenêtres et les dispositifs de protection solaire ont été réalisées par la simulation et montrent la vulnérabilité de ces composants. Une analyse sur le confort et l'inconfort a ensuite été réalisée dans cette partie en utilisant le modèle de bâtiment calibré au quel nous avons adjoint un modèle d'occupation et de fonctionnement des charges internes. Plusieurs configurations sont simulées et une extension vers les bâtiments climatisés est réalisée. Pour les bâtiments ventilés naturellement, on observe que le comble réduit le stress thermique mais conduit à un grand nombre d'heures d'inconfort. Ce cas offre le plus grand nombre de degrés heures quand il s'agit de la ventilation pour le refroidissement. En outre, les améliorations qui consistent à modifier les propriétés de surface sont favorables pour le confort thermique et entraînent systématiquement la baisse des besoins en climatisation et en ventilation pour le refroidissement. Mais, ces propriétés de surfaces varie dans le temps et cette solution requière de la maintenance.

La comparaison des ouvertures montre que la réduction des surfaces de baies favorise le confort et entraine des baisses en termes de besoin en climatisation. Les études de sensibilité locale réalisées nous renseignent que la conception des enveloppes doit être appréhendée séparément lorsqu'il s'agit d'un bâtiment en évolution libre et d'un cas à ambiance contrôlée.

Les études menées se basent sur une norme de confort à vocation internationale. Cependant, il serait intéressant de mener ces études en prenant en compte les paramètres d'adaptation du contexte climatique et culturel. Cela est très ambieux mais, nécessaire dans la démarche vers des bâtiments durables et adaptés au contexte des pays de l'Afrique sub-saharienne.

Conclusion générale et perspectives

La conception des bâtiments en Afrique sub-saharienne est influencée par l'utilisation de techniques et spécifications provenant des pays développés tant au niveau énergétique que mécanique. Un regard sur l'architecture vernaculaire a mis en exergue les différentes mutations en cours dans le secteur. D'une architecture en étroite relation avec le climat du fait de la faiblesse technologique et des facteurs culturels, la conception actuelle des bâtiments est basée sur des technologies provenant d'autres contextes climatiques. Par conséquent on observe des incohérences dans le secteur qui pèsent sur les ressources naturelles et le bien-être des utilisateurs. Cet état de fait et le faible taux d'urbanisation offre un énorme potentiel pour les démarches écologiques en général et bioclimatique en particulier. Il est primordial de se pencher sur les enjeux de conception des bâtiments. Pour ce faire les outils de simulation des performances énergétique ont été utilisés pour l'étude du comportement global des bâtiments sous le climat de Ouagadougou au Burkina Faso. Une présentation de l'univers des outils et environnement de simulation des performances énergétique dans le bâtiment révèle un secteur en constante évolution tourné vers la capacité à représenter la réalité. A l'échelle internationale la simulation énergétique du bâtiment s'intègre progressivement dans les processus de conception en général et particulièrement des bâtiments passifs et de haute efficacité énergétique. Ils constituent un moyen pertinent en termes de coût et de temps de mis en œuvre. Dans le cadre de cette thèse, nous appliquons les outils de simulation pour l'étude des bâtiments existants et aussi comme outils d'aide à la conception.

Concernant le diagnostic des bâtiments existants, il est nécessaire que le modèle puisse représenter la réalité. Une expérimentation sur un bâtiment type de Ouagadougou a été mise en place et les résultats ont été confrontés aux prédictions de la simulation du modèle numérique EnergyPlus du bâtiment. Un processus de calibration basé sur l'analyse de sensibilité et l'optimisation des paramètres a été appliqué pour la comparaison des résultats. Une configuration satisfaisant les conditions de validation a été trouvée. Le modèle calibré a été ensuite utilisé pour mener des études sur le comportement thermique du bâtiment et le confort thermique. Cela nous a permis de mettre en évidence la vulnérabilité des bâtiments face au rayonnement solaire qui prévaut dans ce type de climat. Les composants de l'enveloppe les plus exposés tels que le toit et les composants transparents ont été isolés et des études comparatives ont été menées dans le but d'améliorer leur performance thermique.

Il a alors été question des outils de simulation comme aide à la conception des bâtiments en se focalisant sur les éléments de toiture et les ouvertures. Des techniques

de refroidissement passif ont été implémentées au moyen d'outils d'interopérabilité, et d'optimisation. Concernant l'amélioration des performances des éléments de toiture, nous avons examiné la configuration du comble ainsi que les impacts des solutions passives suivantes : la ventilation, le refroidissement radiatif direct, l'isolation thermique et les barrières anti-rayonnement. De simples solutions comme le refroidissement radiatif direct par la modification des propriétés de surface conduisent à l'amélioration des performances thermiques des éléments de toiture métallique tant répandu dans notre zone climatique. L'impact d'un pigment blanc sur la toiture métallique permet d'atteindre le confort thermique dans 50% et 38% des périodes d'occupation dans le bâtiment en évolution libre respectivement pour les cas de toiture simple et avec comble. La configuration de toiture avec comble tel-que utilisé dans nos régions ne permet pas une utilisation efficace de la ventilation comme solution pour éviter les apports de chaleur par la toiture.

L'utilisation de grandes ouvertures et des matériaux transparents sont récentes dans nos régions. Sur la base d'une étude conceptuelle, les études sur les fenêtres et les dispositifs de protection solaire ont été réalisées en se focalisant sur les apports solaires et l'éclairage naturel. Les protections solaires fixes comme les loggias sont pertinentes pour nos régions et des dimensions optimales ont été trouvées par l'application d'algorithme d'optimisation. La taille des ouvertures a aussi fait l'objet d'étude d'optimisation menée sur les apports solaires et l'éclairage naturel. Cette étude a conduit à des fenêtres de faibles surfaces qui démontre le potentiel de l'éclairage naturel et attirent l'attention des concepteurs du bâtiment sur l'attention particulière que requièrent les ouvertures et l'utilisation des parois transparentes dans notre contexte climatique. L'utilisation des fenêtres optimisées dans le bâtiment étudié entraîne une réduction de l'ordre de 22% sur l'énergie extraite pour le refroidissement du bâtiment climatisé et une réduction de l'ordre de 5% sur la période d'inconfort dans le bâtiment en évolution libre.

Enfin dans ce travail, l'utilisation des techniques d'analyse du bâtiment nous ont permis d'émettre des recommandations sur la conception des bâtiments dans notre contexte climatique. Les limites de la construction en matériaux conventionnels sont démontrées à travers l'analyse de la sévérité du climat qui met en évidence les besoins énormes en refroidissement. La nécessité d'aborder de manière séparée la conception de l'enveloppe du bâtiment est ressortie des études paramétriques menées. Il faut distinguer les bâtiments en évolution libre des ambiances contrôlées. Pour les bâtiments en évolution libre, les parois moins inertielles favorisent le confort thermique dans le bâtiment. Pour les bâtiments climatisés l'inertie des parois est recommandée. Dans les deux cas l'utilisation de surfaces de faibles coefficients d'absorptivité solaire sont souhaitables.

Au terme de cette étude, nous avons montré que la simulation peut permettre de répondre aux besoins en bâtiments passif adaptés aux contextes énergétiques et climatiques en Afrique sub-saharienne. Pour améliorer la qualité des prédictions,

un travail important devra être réalisé pour doter le secteur d'une base de données qualitative sur les propriétés des matériaux de construction. Les études sur les éléments de toitures doivent être poursuivies au niveau des matériaux et aussi sur la morphologie du toit afin de trouver des configurations mieux adaptées au climat. Des études sur le vieillissement des pigments réfléchissants dans notre contexte climatique permettront d'estimer les impacts économiques de cette solution. Ce travail a constitué un premier pas vers la conception des fenêtres et il serait intéressant de les évaluer en prenant en compte les réalités culturelles et les autres critères (ventilation, vue sur l'environnement extérieur) qui entrent en compte dans la conception des éléments de fenêtrage. Concernant la conception de l'enveloppe du bâtiment l'application d'une analyse de sensibilité globale au bâtiment conventionnel serait intéressant et permettra de mettre en évidence les différentes interactions entre les paramètres. Il est aussi important caractériser l'aérodynamique des bâtiments ce qui permettra de disposer de paramètres fiables pour une meilleure exploration du phénomène de ventilation naturelle notamment la ventilation pour le confort. A cela on doit ajouter la nécessité de mener des investigations sur les occupants afin de caractériser leurs attentes en termes de confort thermique et déterminer des critères d'évaluation mieux adaptés aux contextes climatiques de l'Afrique sub-saharienne.

Annexe1 : Transfert de chaleur

Modèles de transfert de chaleur

Modèles de transfert par conduction

Le transfert de chaleur par conduction en régime dynamique à travers la paroi est réalisé à l'aide de la méthode des "Conduction Transfer Functions" (CTFs). Pour le calcul des fonctions de transferts EnergyPlus se base sur la méthode des représentations d'état. Lorsque la représentation est appliquée à l'analyse des équations de la conduction de chaleur en régime transitoire, et que le domaine de l'espace est discrétisé au moyen de la méthode des différences finies on obtient la formulation suivante :

$$\frac{d \begin{bmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix}}{dx} = [\mathbf{A}] \begin{bmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix} + [\mathbf{B}] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$\begin{bmatrix} q_i'' \\ q_o'' \end{bmatrix} = [\mathbf{C}] \begin{bmatrix} T_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ T_n \end{bmatrix} + [\mathbf{D}] \begin{bmatrix} T_i \\ T_o \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Avec $(T_k, k = 1, \dots, n)$: les variables d'état étant les températures aux noeuds discrets ;

T_i et T_o : les entrées, la température intérieure et extérieure ;

q_i'' et q_o'' : le flux de chaleur à travers les deux surfaces.

Pour une paroi donnée, le flux de chaleur des faces à l'intérieur q_{ki}'' et à l'extérieur q_{ko}'' sont les suivantes :

$$q''_{ki}(t) = -Z_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_0 T_{0,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{0,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (\text{A.3})$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_0 T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_0 T_{0,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{0,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (\text{A.4})$$

X_j : Coefficient de facteur de réponse extérieur ;
 Y_j : Coefficient de facteur de réponse aux intersection ;
 Z_j : Coefficient de facteur de réponse aux intérieur ;
 T_i : la température de la paroi interne ; Φ_j : coefficient de facteur de réponse du flux de chaleur ;
 T_o : la température de la paroi externe ;
 q''_{ko} : Flux de chaleur par conduction sur la paroi externe ;
 q''_{ki} : Flux de chaleur par conduction sur la paroi interne ;
 δ : le pas de temps.

A noter que les premiers termes de la série (ceux avec l'indice 0) ont été séparés du reste afin de faciliter la résolution de la température actuelle dans le système de solution. Ces équations indiquent que le flux de chaleur des deux côtés de la surface de n'importe quel élément de construction générique est en relation linéaire avec les températures actuelles et certaines antérieures des surfaces intérieures et extérieures, ainsi que les valeurs de flux précédentes.

Modèles de transfert par convection

Le coefficient de convection total est la somme de deux composants.

$$h_c = h_f + h_n \quad (\text{A.5})$$

Avec h_f : le coefficient de convection forcé ;
 h_n : le coefficient de convection naturel.

La valeur du coefficient de convection extérieur, est étroitement liée à la vitesse du vent et peut être estimée, par la corrélation suivante :

$$h_f = 2.53 W_f R_f \left(\frac{P V_z}{A} \right)^{1/2} \quad (\text{A.6})$$

W_f prend en compte l'orientation par rapport au vent. il prend la valeur 1 pour les côtés exposés au vent et 0.5 pour ceux sous le vent.

Le paramètre R_f défini la rugosité de la surface, il prend les valeurs indiquées dans le tableau A.1.

TABLE A.1 – coefficient de rugosité

Rugosité	très rugueux	rugueux	peu rugueux	peu lisse	lisse	très lisse
R_f	2,17	1,67	1,52	1,13	1,11	1

Le flux convectif à l'intérieur de la pièce est dû essentiellement à la convection naturelle engendrée par une différence de température entre la paroi et l'ambiance intérieure. Le coefficient de convection est calculé par la relation suivante :

-Pour une surface verticale

$$h = 1.31 |\Delta T|^{1/3} \quad (\text{A.7})$$

-Pour $\Delta T < 0$ et la surface est orientée vers le haut ou bien $\Delta T > 0$ et la surface est orientée vers le bas ;

$$h = \frac{9.482 |\Delta T|^{1/3}}{7.283 - |\cos \Sigma|} \quad (\text{A.8})$$

-Pour $\Delta T > 0$ et la surface est orientée vers le haut ou bien $\Delta T < 0$ et la surface est orientée vers le bas

$$h = \frac{1.81 |\Delta T|^{1/3}}{1.382 + |\cos \Sigma|} \quad (\text{A.9})$$

ΔT : la différence entre la température de l'air et celle de la paroi ;

Σ : l'inclinaison de la surface.

Échanges par rayonnement

calcul des paramètres du ciel EnergyPlus calcule l'intensité du rayonnement infrarouge horizontal par la relation suivante.

$$IR_{Horizontal} = \varepsilon_{ciel} \sigma T_{air}^4 \quad (\text{A.10})$$

L'émissivité du ciel est obtenue par la relation suivante.

$$\varepsilon_{ciel} = (0.787 + 0.764 \ln(\frac{T_{sat}}{273}))(1 + 0.0224N - 0.0035N^2 + 0.00028N^3) \quad (\text{A.11})$$

T_{sat} : la température de saturation de l'air ;

ε_{ciel} : l'émissivité du ciel ;

N : le taux de couverture. La température du ciel est déduite par la formulation suivante.

$$T_{ciel} = \left(\frac{IR_{Horizontal}}{\sigma} \right)^{0.25} \quad (\text{A.12})$$

Échanges radiatifs externes en grandes longueur d'onde (Glo) Dans le domaine des grandes longueurs d'onde (GLO), une surface en contact avec l'ambiance extérieure échange de l'énergie radiante avec le sol, les surfaces voisines, l'air ambiant et la voûte céleste. En considérant que le bâtiment est isolé, nous excluons les échanges avec les surfaces voisines et le bilan du flux radiatif GLO net sur une surface est le suivant :

$$Q_{glo} = \varepsilon\sigma(F_{sol}(T_{sol}^4 - T_{surf}^4) + F_{ciel}(T_{ciel}^4 - T_{surf}^4) + F_{air}(T_{air}^4 - T_{surf}^4)) \quad (A.13)$$

T_{sol} : la température du sol ;
 T_{surf} : la température de la surface ;
 T_{air} : la température de l'air ;
 T_{ciel} : la température du ciel.

$$\begin{cases} F_{sol} = 0.5(1 - \cos\Sigma) \\ F_{ciel} = 0.5(1 + \cos\Sigma)\beta \\ F_{air} = F_{ciel}(1 - \beta) \\ \beta = \sqrt{0.5(1 + \cos\Sigma)} \end{cases} \quad (A.14)$$

F_{sol} : le facteur de forme du sol ;
 F_{ciel} : le facteur de forme du ciel ;
 F_{air} : le facteur de forme de l'air ;
 et β le coefficient multiplicateur entre le facteur de forme de l'air et du ciel.

Annexe2 : Calcul de l'éclairage naturel

Calcul de la composante directe de l'éclairage naturel

La composante directe de l'éclairement naturel au point de référence provenant d'une fenêtre est déterminée en partitionnant la fenêtre en éléments x-y et en trouvant le flux atteignant le point de référence dû à chaque portion. La Figure A.1 illustre le phénomène. L'éclairement horizontal au point de référence, \vec{R}_{ref} dû à un élément de la fenêtre est :

$$dE_h = L_w d\Omega \cos\gamma \quad (A.15)$$

$$d\Omega = \frac{dx dy}{D^2} \cos B \quad (A.16)$$

$$D = \left| \bar{R}_{win} - \bar{R}_{win} \right| \quad (A.17)$$

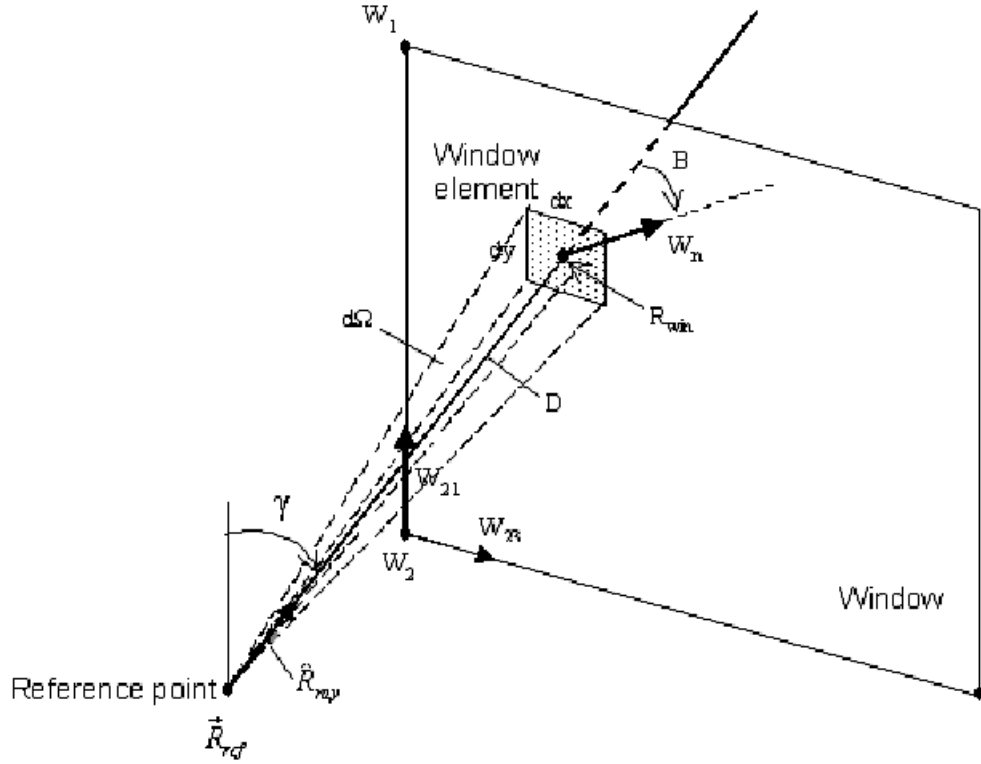


FIGURE A.1 – Illustration du calcul de la composante direct de l'éclairement naturel

$$\cos B = \hat{R}_{ray} \hat{W}_n \quad (A.18)$$

$$\vec{R}_{ray} = \frac{(\vec{R}_{win} - \vec{R}_{ref})}{D} \quad (A.19)$$

$$\hat{W}_n = \hat{W}_{21} \hat{W}_{23} = \left(\frac{\vec{W}_1 - \vec{W}_2}{|\vec{W}_1 - \vec{W}_2|} \right) \left(\frac{\vec{W}_1 - \vec{W}_2}{|\vec{W}_1 - \vec{W}_2|} \right) \quad (A.20)$$

dx, dy : taille des éléments infinitésimal de fenêtre ;
 $d\Omega$: Angle solide vue à partir d'un élément infinitésimal de la fenêtre ;
 D : distance séparant l'élément et le point de référence ;
 γ : angle entre le rayon provenant du point de référence vers l'élément considéré sur la fenêtre et la verticale ;
 \hat{W}_n : vecteur normal à la fenêtre ;
 \hat{W}_{21} : vecteur unitaire suivant l'axe des y ;
 \hat{W}_{23} : vecteur unitaire suivant l'axe des x.

L'éclairement net dû à toute la fenêtrés est obtenue par l'équation suivante :

$$E_h = \sum L_w d\Omega \cos\gamma \quad (\text{A.21})$$

Dans le cas d'une fenêtre sans protection solaire

$$L_w = L\tau_{vis}\cos B \quad (\text{A.22})$$

Dans le cas d'une protection solaire $L_w = L_{w.sh}$ et $L_{w.sh}$ est calculé selon la procédure décrite dans (Winkelmann, 1983).

τ_{vis} : Transmittivité du verre ;

L : l'éclairement du ciel.

Calcul de la composante réfléchie de l'éclairage naturel

L'éclairement en un point de référence après réflexion sur les parois internes est calculé en utilisant la méthode se "Split-flux". Par cette méthode, la lumière émise par la fenêtre est subdivisée en deux parties. Un flux Φ_{FW} dirigé vers le bas, qui tombe sur le sol et les parties des parois au-dessous du plan horizontal imaginaire passant par le centre de la fenêtre (fenêtre plan médian), et un flux Φ_{CW} vers le haut, qui frappe le plafond et des parties des parois au-dessus du plan médian fenêtre. Une fraction de ces flux est absorbée par les surfaces de la pièce. Le reste, réfléchi, F_1 , est approché par la formulation suivante :

$$F_1 = \Phi_{FW}\rho_{FW} + \Phi_{CW}\rho_{CW} \quad (\text{A.23})$$

où ρ_{FW} est la réflectivité moyenne du sol et des parties des parois au-dessous du plan médian de la fenêtre, et ρ_{CW} est la réflectivité moyenne du plafond et des parties des parois au-dessus.

Pour trouver l'éclairement moyen final , E_r interne réfléchi, sur les surfaces de la pièce un équilibre de flux est utilisé. Le total reflète le flux absorbé par les surfaces de la pièce (ou perdu à travers les fenêtres) est $AE_r(1 - \rho)$, où A représente la surface totale vue à l'intérieur. Il s'agit de la surface de plancher, des murs, des plafonds et fenêtres de la pièce. ρ est la moyenne des réflectivités des surfaces dans la pièce , y compris celle des fenêtres.

$$F_1 = AE_r(1 - \rho) \quad (\text{A.24})$$

$$E_r = \frac{F_1}{A(1 - \rho)} \quad (\text{A.25})$$

Annexe3 : Calcul de la vitesse du vent local

Afin de tenir compte des perturbations aérodynamiques du milieu bâti et des conditions topographiques du site, la vitesse du vent (V_{met}) extraite du fichier des données climatique (mesurée à la station météorologique la plus proche) doit être ajustée en fonction des particularités des conditions de terrain qui séparent le site de mesure du site d'implantation. V_{met} est généralement mesurée en terrain plat et dégagé et l'anémomètre qui enregistre V_{met} est généralement situé à une hauteur H_{met} égale à 10 m au-dessus du niveau du sol. Ainsi, la vitesse locale du vent (V_{locale}) à une hauteur H aux abords du bâtiment peut être estimée par l'équation :

$$V_{locale} = V_{me} \left(\frac{\delta}{H_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \left(\frac{H}{\delta} \right)^{\delta} \quad (A.26)$$

FIGURE A.2 – Coefficients et exposants empiriques pour le calcul de la vitesse du vent

Catégorie du terrain	Description	Exposant " α "	Épaisseur de la couche " δ "
1	Centres des grandes villes, dans lesquelles au moins 50% des bâtiments sont supérieurs à 21 m, sur une distance d'au moins 2000 m	0.33	460
2	Les zones urbaines et suburbaines, les zones boisées, ou d'autres terrains avec des obstacles multiples très rapprochés d'une taille voisine de celle des maisons individuelle ou plus, et s'étendant sur une distance d'au moins 2000 m	0.22	370
3	Des terrains avec des obstacles éparpillés ayant des hauteurs généralement inférieures à 10 m, y compris les zones plats et dégagés ^a	0.14	270
4	Des terrains plats non obstrués et exposés au vent qui s'écoule sur l'eau sur une distance au moins égale à 1.6 km	0.10	210

Bibliographie

- Ajibola, K. 1997. "Ventilation of spaces in a warm-humid climate-case study of some housing types." *Renewable Energy* 10 (1) : 61–70. 11, 111
- Ajibola, Kolawole. 2001. "Design for comfort in Nigeria : a bioclimatic approach." *Renewable Energy* 23 (1) : 57 – 76. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001130>. 11
- Akbari, H. 2003. "Measured energy savings from the application of reflective roofs in two small non-residential buildings." *Energy* 28 (9) : 953 – 967. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054420300032X>. 98
- Akbari, Hashem, Ronnen Levinson, and Stephanie Stern. 2008. "Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies." *Solar Energy* 82 (7) : 648 – 655. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X08000030>. 79
- Allard, F., and M. Santamouris. 1998. *Natural Ventilation in Buildings : A Design Handbook*. 99
- Andre, Philippe. 2013. *Total energy use in buildings analysis and evaluation methods Final Report Annex 53 Volume VI Energy performance analysis*. Philippe andre. AIE-EBC. http://www.iea-ebc.org/fileadmin/user_upload/images/Pictures/EBC_Annex_53_Appendix_Volume_6.pdf. 45
- ASHRAE. 2002. *ASHRAE Guideline 14-2002 : Measurement of Energy and Demand Savings*. Tech. rep.. ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers), Atlanta. 45, 64
- ASHRAE. 2009a. "2009 ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 13 : Indoor environmental modeling." ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers), Atlanta. 65, 71
- ASHRAE. 2009b. "2009 ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 15 (Fenestration)." ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers), Atlanta. 34
- Ashrae. 2009,. "CHAPTER 9 THERMAL COMFORT." In *ASHRAE Handbook - Fundamentals (S-I Edition)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 23, 24

- ASHRAE. 2009. "CHAPTER 24 AIRFLOW AROUND BUILDINGS." In *ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 100
- A.Tablada, A.M. De la Peña, and F. De Troyer. 2005. "Thermal Comfort of Naturally Ventilated Buildings in Warm-Humid Climates : field survey.." *The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture 2005* ed. PLEA2005. 24
- Attia, S. 2010. *Building performance simulation tools : Selection criteria and user survey*. rapport de recherche. Université catholique de Louvain, Belgique. 43
- Attia, Shady. 2012. "A Tool for Design Decision Making Zero Energy Residential Buildings in Hot Humid Climates." Ph.D. thesis. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme, LOCI,UCL. 44
- Attia, Shady, Elisabeth Gratia, André De Herde, and Jan L.M. Hensen. 2012. "Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design." *Energy and Buildings* 49 (0) : 2 – 15. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881200045X>. 45
- Atzeri, Anna, Francesca Cappelletti, and Andrea Gasparella. 2014. "Internal Versus External Shading Devices Performance in Office Buildings." *Energy Procedia* 45 (0) : 463 – 472. {ATI} 2013 - 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214000514>. 112
- Augenbroe, G. 2002. "Trends in buildings simulation." *Building and environment Journal* 37 : 891–902. 49
- Augenbroe, Godfried. 2003. *Advanced Building Simulation*. Spon Pres. 49
- Augenbroe, Godfried, Pieter de Wilde, Hyeun Jun Moon, and Ali Malkawi. 2004. "An interoperability workbench for design analysis integration." *Energy and Buildings* 36 (8) : 737 – 748. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880400026X>. 2, 40
- Autodesk. 2011. *Autodesk Ecotect Analysis*. Tech. rep.. Autodesk. 115
- Awbi, H.B. 1994. "Design considerations for naturally ventilated buildings." *Renewable Energy* 5 (5â8) : 1081 – 1090. Climate change Energy and the environment. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096014819490135X>. 71, 100
- Bazjanac, V., and D. Crawley. 1999. "Industry foundation classes and interoperable commercial software in support of design energy efficient buildings." *Building Simulation Conference, Japan, .* 48

Bibliographie

- Bou-Saada, T. E., and J. S. Haberl. 1995. "An Improved Procedure for Developing Calibrated Hourly Simulation Models." IBPSA-USA. <http://hdl.handle.net/1969.1/94780>. 64
- Brasseur, Gérard. 1975. "L'habitat rural africain grands traits." *Etudes Scientifiques* 5–10. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010022593>. xv, 9
- Buratti, Cinzia, and Paola Ricciardi. 2009. "Adaptive analysis of thermal comfort in university classrooms : Correlation between experimental data and mathematical models." *Building and Environment* 44 (4) : 674 – 687. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230800125X>. 23
- C1313, ASTM. 2010. "ASTM : C1313." . 98
- Cena, Krzysztof, and Richard de Dear. 2001. "Thermal comfort and behavioural strategies in office buildings located in a hot-arid climate." *Journal of Thermal Biology* 26 (45) : 409–414. International Thermal Physiology Symposium. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456501000523>. 26
- Ciampi, M., F. Leccese, and G. Tuoni. 2003. "Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings." *Solar Energy* 75 (6) : 491 – 502. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003396>. 35
- Clarke, J.A. 2001. *Energy Simulation in Building Design*. Butterworth-Heinemann. xv, 42
- Clarke, J.A., C.M Johnstone, I. Kondratenko, M. Lever, L.B McElroy, L. Prazeres, P.A Strachan, F. McKenzie, and G. Peart. 2004. "Using simulation to formulate domestic sector upgrading strategies for Scotland." *Energy and Buildings* 36 (8) : 759 – 770. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804000301>. 2, 40
- Clarke, J.A., P.A. Strachan, and C Pernot. 1993. "Approach to the calibration of building energy simulation models." *ASHRAE Transactions* 99, : 917–927. 63
- Clarke, J.A., and P.P. Yaneske. 2009. "A rational approach to the harmonisation of the thermal properties of building materials." *Building and Environment* 44 (10) : 2046 – 2055. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230900047X>. 79
- Coakley, Daniel, Paul Raftery, and Marcus Keane. 2014. "A review of methods to match building energy simulation models to measured data." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (0) : 123 – 141. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114003232>. 44, 45, 63

- Coch, Helena. 1998. "Chapter 4 : Bioclimatism in vernacular architecture." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2 (12) : 67–87. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032198000124>. 7
- Cole, R.J. 1976. "The longwave radiative environment around buildings." *Building and Environment* 11 (1) : 3 – 13. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360132376900147>. 37
- Cook, Jeffrey. 1996. "Architecture indigenous to extreme climates." *Energy and Buildings* 23 (3) : 277 – 291. {PLEA} '94 International Conference. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778895009531>. 7
- Costa, Roberto. 1989. "Architecture in black Africa Between development and tradition." *Solar & Wind Technology* 6 (4) : 383 – 387. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0741983X8990057X>. 7, 11
- Crawley, D. B., L Lawrie., F. Winkelmann, F.Buhl, J. Huang, C. Pedersen ., and R. Strand. 2001. "EnergyPlus : Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program.." *Energy and Buildings* 33 : 319. 76
- David, M., M. Donn, F. Garde, and A. Lenoir. 2011. "Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades." *Building and Environment* 46 (7) : 1489 – 1496. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132311000321>. 112, 120
- de Dear, R.J., and GS. Brager. 1998. "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference." *ASHRAE Tech Data Bull* 14(1) : 27–49. 26
- de Dear, R. A . 1998. "global database of thermal comfortfield experiments." *ASHRAE Transaction* 104(1) : 1141â1152. 26
- de Wit, S., and G. Augenbroe. 2002. "Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications." *Energy and Buildings* 34 (9) : 951 – 958. A View of Energy and Bilding Performance Simulation at the start of the third millennium. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000701>. 62
- Dimoudi, A., A. Androutsopoulos, and S. Lykoudis. 2006. "Summer performance of a ventilated roof component." *Energy and Buildings* 38 (6) : 610 – 617. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805001957>. 35
- Dubois, M.C. 1997. *Solar shading and building energy use : A literature review, part I.Report TABKâ97/3049*. Tech. rep.. Lund Inst. of Technology, Dept. of Building Science, Lund (Sweden). 34

Bibliographie

- Dubois, M.C. 2003. "Shading devices and daylight quality : an evaluation based on simple performance." *Lighting Research and Technology* 35(1) : 61–76. 34
- Eberhart, R.C., and J. Kennedy. 1995. "A new optimizer using particle swarm theory. .." *Sixth International Symposium on Micromachine and Human Science* 39â43. 57
- Ebrahimpour, Abdulsalam, and Mehdi Maerefat. 2011. "Application of advanced glazing and overhangs in residential buildings." *Energy Conversion and Management* 52 (1) : 212 – 219. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410002827>. 112
- Edmonds, I.R, and P.J Greenup. 2002. "Daylighting in the tropics." *Solar Energy* 73 (2) : 111–121. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X02000397>. 34, 111
- EN15251. 2007. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of Energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics..* Tech. rep.. Brussels. 27
- EnergyPlus. 2013. *EnergyPlus engineering reference : the reference to EnergyPlus calculations..* Tech. rep.. Berkeley, CA : Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 72, 85, 100
- EnergyPlus8.00. 2013. *EnergyPlus engineering reference ; The reference to Energy-Plus calculation.* Lawrence Berkeley National Laboratory. 91
- Eskin, N., and H. Turkmen. 2008. "Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey." *Energy and Buildings* 40 (5) : 763–773. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001685>. 112
- Evins, R. 2013. "A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (0) : 230–245. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000920>. 55, 56
- Fanger, P.O., B.M. Ipsen, G. Langkilde, B.W. Olesen, N.K. Christensen, and S. Tanabe. 1985. "Comfort limits for asymmetric thermal radiation." *Energy and Buildings* 8 (3) : 225 – 236. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778885900064>. 24, 25
- Florides, G.A, S.A Kalogirou, S.A Tassou, and L.C Wrobel. 2000. "Modeling of the modern houses of Cyprus and energy consumption analysis." *Energy* 25

- (10) : 915 – 937. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054420000030X>. 112
- Freewan, A.A., L. Shao, and S. Riffat. 2008. “Optimizing performance of the lightshelf by modifying ceiling geometry in highly luminous climates.” *Solar Energy* 82 (4) : 343–353. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07001843>. 34
- Freewan, Ahmed A.Y. 2014. “Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions.” *Solar Energy* 102 (0) : 14 – 30. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14000279>. 112
- Fritszon, Peter. 2004. *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. Wiley-IEEE Press. 53
- Fritszon, P. 2006. *Tutorial-Introduction to Object-Oriented Modeling and Simulation with OpenModelica*. www.modelica.org du 25/01/2012. 53
- Gagge, A.P., J.A.J. Stolwijk, and J.D. Hardy. 1967. “Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures.” *Environmental Research* 1 (1) : 1 – 20. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0013935167900023>. 24
- Gagge, A. Pharo. 1981. “Chapter 5 Rational Temperature Indices of Thermal Comfort.” In *Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort*, Vol. 10 of *Studies in Environmental Science* edited by K. Cena and J.A. Clark. 79 – 98. Elsevier. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166111608710823>. 24
- Gagliano, A., F. Patania, F. Nocera, A. Ferlito, and A. Galesi. 2012. “Thermal performance of ventilated roofs during summer period.” *Energy and Buildings* 49 (0) : 611 – 618. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812001557>. 35
- Geetha, N. B., and R. Velraj. 2012. “Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage : A review.” *Energy Education Science and Technology Part A : Energy Science and Research* 29(2) : 913–946. 32, 35
- Ghiaus, Cristian. 2003. “Free-running building temperature and {HVAC} climatic suitability.” *Energy and Buildings* 35 (4) : 405 – 411. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880200110X>. 36

Bibliographie

- Ghiaus, Cristian. 2006. "Equivalence between the load curve and the free-running temperature in energy estimating methods." *Energy and Buildings* 38 (5) : 429 – 435. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805001428>. xv, 36, 37
- Ghiaus, Cristian, and Francis Allard. 2006. "Potential for free-cooling by ventilation." *Solar Energy* 80 (4) : 402 – 413. Urban Ventilation. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05002677>. 35, 36, 136
- Givoni, Baruch. 1981. "Conservation and the use of integrated-passive energy systems in architecture." *Energy and Buildings* 3 (3) : 213 – 227. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778881900074>. 23
- Givoni, B. 1991. "Performance and applicability of passive and low-energy cooling systems." *Energy and Buildings* 17 : 177 – 199. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889190106D>. 35
- Givoni, Baruch. 1992. "Comfort, climate analysis and building design guidelines." *Energy and Buildings* 18 (1) : 11 – 23. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889290047K>. 27, 28, 29, 30, 35
- Gratia, E., and A. De Herde. 2007. "The most efficient position of shading devices in a double-skin facade." *Energy and Buildings* 39 (3) : 364–373. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806002106>. 34
- Haberl, J. S. 2004. *Literature Review of Uncertainty of Analysis Methods (Cool Roofs)*. Tech. rep.. Report to the Texas Commission on Environmental Quality. 98
- HABITAT, ONU. 2014. *L'ETAT DES VILLES AFRICAINES 2014 Réinventer la transition urbaine*. 1, 5
- Hadavand, M., M. Yaghoubi, and H. Emdad. 2008. "Thermal analysis of vaulted roofs." *Energy and Buildings* 40 (3) : 265 – 275. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000783>. 10, 35
- Hensen, J.L.M. 1991. "On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system.." Ph.D. thesis. Eindhoven University of Technology (FAGO). 44, 45
- Hensen, J.L.M. 1993. "Towards an integral approach of building and HVAC system." *Energy and Buildings* 19 (4) : 297 – 302. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889390015M>. 43

- Hensen, J.L.M. 2004. "Towards more effective use of building performance simulation in design.." In *Leeuwen, J.P. van & Timmermans, H.J.P. (Eds.) Proceedings of the 7th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning*, 2-5 July. 43, 46, 48
- Hensen, Jan, and Godfried Augenbroe. 2004. "Performance simulation for better building design." *Energy and Buildings* 36 (8) : 735 – 736. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804001690>. 43
- Hensen, J.L.M, R Lamberts, and C.O.R Negrao. 2002. "A view of energy and building performance simulation at the start of the third millennium." *Energy and Buildings* 34 (9) : 853 – 855. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000634>. 43
- Herde, A.De, and A.Liébard. 1996-2004. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. xv, 7, 22
- Hernández-Pérez, I., G. Álvarez, J. Xamán, I. Zavala-Guillén, J. Arce, and E. Simá. 2014. "Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components-A review." *Energy and Buildings* 80(0) : 81–105. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.008>. 98
- Hong, Tianzhen, S.K Chou, and T.Y Bong. 2000. "Building simulation : an overview of developments and information sources." *Building and Environment* 35 (4) : 347 – 361. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132399000232>. 44
- Hong, Tianzhen, Jinqian Zhang, and Yi Jiang. 1997. "IISABRE : An integrated building simulation environment." *Building and Environment* 32 (3) : 219 – 224. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132396000571>. 44
- Hooke, R., and T.A. Jeeves. 1961. "Direct search solution of numerical statical problems." *Journal of the Association for Computing Machinery* 8 : 212–229. 56
- Høseggen, R., B.J. Wachenfeldt, and S.O. Hanssen. 2008. "Building simulation as an assisting tool in decision making : Case study : With or without a double-skin façade?" *Energy and Buildings* 40 (5) : 821 – 827. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001740>. 44
- INSD. Octobre 2007. *Rapport de synthèse :Analyse des résultats du recensement général de la population et de l'habitat*. xix, 6, 14, 17
- IPMVP. 2002. *Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings Volume I*. Tech. rep. www.ipmvp.org. 64

Bibliographie

- ISO, 8995. 2002. -1 :2002 (CIE S 008/E :2001) : *Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : Interieur*. Tech. rep. 34
- Iwaro, Joseph, and Abraham Mwashia. 2010. "A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries." *Energy Policy* 38 (12) : 7744 – 7755. Special Section : Carbon Reduction at Community Scale. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510006427>. xv, 1, 30, 31
- Izard, J.L. 2014. "Soleil et architecture Contrôle d'ensoleillement par formes architecturales." *Techniques de l'ingénieur la lumière et l'isolation dans la construction* (ref. article : c3311). <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/la-lumiere-et-l-isolation-dans-la-construction-42553210/soleil-et-architecture-c3311/>. 33
- Jaber, S., and S. Ajib. 2011. "Thermal and economic windows design for different climate zones." *Energy and Buildings* 43 (11) : 3208–3215. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811003690>. 112
- Janda, Kathryn B., and John F. Busch. 1994. "Worldwide status of energy standards for buildings." *Energy* 19 (1) : 27 – 44. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544294901023>. 1, 30
- Jerraya, A.A., M. Romdhani, C. Valderrama, Ph. Le Marrec, F. Hessel, G. Marchioro, and J.M. Daveau. 1997. *Hardware and Software Co-design : Principles and Practice, chapter Languages for system-level specification and design*. Kluwer Academic Publishers. 48
- Karekezi, Stephen, and Lugard Majoro. 2002. "Improving modern energy services for Africa's urban poor." *Energy Policy* 30 (11-12) : 1015 – 1028. Africa : Improving Energy Services for the Poor. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421502000551>. 6
- Kim, G., H.S Lim, T.S Lim, L. Schaefer, and J.T Kim. 2012. "Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings." *Energy and Buildings* 46 (0) : 105–111. Sustainable and healthy buildings. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811005032>. 34
- Kisanga, Aida U. 1990. "The challenge faced by the building materials industries in the developing countries in the 1990s : with special reference to Tanzania." *Habitat International* 14 (4) : 119 – 132. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019739759090009P>. 10

- Kottex, Markus, Jurgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, and Franz Rubel. 2006. "World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated." *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3) : 259–263. 16
- Krüger, E.L., and C. Laroca. 2010. "Thermal performance evaluation of a low-cost housing prototype made with plywood panels in Southern Brazil." *Applied Energy* 87 : 661–672. 64
- Kültürlü, Sinem, and Nil Tülrkeri. 2012). "Assessment of long term solar reflectance performance of roof coverings measured in laboratory and infield." *Building and Environment* 48 48 : 164–172. 70, 80
- Lam, Joseph C. 2000. "Shading effects due to nearby buildings and energy implications." *Energy Conversion and Management* 41 (7) : 647 – 659. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001387>. 112
- Laura Bellia, Francesco Minichiello, Francesco De Falco. 2013. "Effects of solar shading devices on energy requirements of standalone office buildings for Italian climates." *Applied Thermal Engineering* . 112
- Levinson, Ronnen, Hashem Akbari, and Paul Berdahl. 2010. "Measuring solar reflectance Part I : Defining a metric that accurately predicts solar heat gain." *Solar Energy* 84 (9) : 1717 – 1744. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10001775>. 79
- Levinson, Ronnen, Paul Berdahl, and Hashem Akbari. 2005. "Solar spectral optical properties of pigments Part I : model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 89 (4) : 319 – 349. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024805000048>. 79
- Levinson, Ronnen, Paul Berdahl, Hashem Akbari, William Miller, Ingo Joedicke, Joseph Reilly, Yoshi Suzuki, and Michelle Vondran. 2007. "Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91 (4) : 304 – 314. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024806004077>. 79
- Luersen, Marco Antônio. 2004. "GBNM : Un Algorithme d'Optimisation par Recherche Directe - Application à la Conception de Monopalmes de Nage." Ph.D. thesis. Ecole Doctorale SPMI - Institut National des Sciences Appliquées de Rouen. 56
- M. Trcka, J.L.M Hensen. 2006.. "Model and tool requirements for co-simulation of building performance,." In *proceedings of the 15th IASTED (Interfational conference on Applied Simulation and Modelling)*, pp.7, . 48

Bibliographie

- Macdonald, Iain, and Paul Strachan. 2001. "Practical application of uncertainty analysis." *Energy and Buildings* 33 (3) : 219 – 227. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778800000852>. 79
- MacQueen, John. 1997. "The modelling and simulation of energy management control systems." Ph.D. thesis. Department of Mechanical Engineering Energy Systems Research Unit Energy Systems Division University of Strathclyde, Glasgow, UK. 2, 40
- marrec, Philippe Le. 2000. "Cosimulation multiniveaux dans un flot de conception multilangage." Ph.D. thesis. laboratoire TIMA Ecole Doctorale "Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal. 49
- Mateus, Nuno M., Armando Pinto, and Guilherme Carrilho da Graça. 2014. "Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell." *Energy and Buildings* 75 (0) : 511 – 522. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814001571>. 64
- Mathieu, LLAMOUR. 2010. *Optimisation de l'énergie solaire par approches biomimétiques et simulations dynamiques*. Tech. rep.. Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie. 56
- meteonorm 7. 2013. *Global Meteorological Database*. Tech. rep.. Genossenschaft METEOTEST. <http://meteonorm.com/>. 113
- Milne, M., and B. Givoni. 1979. *Architectural design based on climate*,. chap. 6. McGraw-Hill, New York, ,. 30
- Modelisar. 2010a. "Functional Mock-up Interface for Co-Simulation MODELISAR (ITEA 2 07006)." . 50
- Modelisar. 2010b. "Functional Mock-up Interface for Model Exchange MODELISAR (ITEA 2 07006)." . 100
- Morbitzer, Christoph Andreas. 2003. "Towards the Integration of Simulation into the Building Design Process." Ph.D. thesis. Energy System Research Unit Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde. 45
- Moriarty, Patrick. 1979. "The case for traditional housing in tropical Africa." *Habitat International* 4 (3) : 285 – 290. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0197397579900389>. 10, 11, 13
- Muselli, Marc. 2010. "Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings." *Energy and Buildings* 42 (6) : 945 – 954. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810000125>. 37

- Mustafaraj, Giorgio, Dashamir Marini, Andrea Costa, and Marcus Keane. 2014. "Model calibration for building energy efficiency simulation." *Applied Energy* 130 (0) : 72 – 85. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914005145>. 63
- Nabil, A., and J. Mardaljevic. 2005. "Useful daylight illuminance : a new paradigm for assessing daylight in buildings." *Lighting Research and Technology* 37 (1) : 41–57. 34
- Nabil, Azza, and John Mardaljevic. 2006. "Useful daylight illuminances : A replacement for daylight factors." *Energy and Buildings* 38 (7) : 905 – 913. Special Issue on Daylighting Buildings. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806000636>. 34
- Nahar, N. M., P. Sharma, and M. M. Purohit. 1999. "Studies on solar passive cooling techniques for arid areas." *Energy Conversion and Management* 40(1) : 89–95. [http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00039-9). 97
- Nguyen, Anh Tuan, and Sigrid Reiter. 2012. "An investigation on thermal performance of a low cost apartment in hot humid climate of Danang." *Energy and Buildings* 47 (0) : 237 – 246. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811005937>. 64
- Nguyen, Anh-Tuan, Sigrid Reiter, and Philippe Rigo. 2014. "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis." *Applied Energy* 113 (0) : 1043 – 1058. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913007058>. 55
- Nicol, Fergus. 2004. "Adaptive thermal comfort standards in the hot and humid tropics." *Energy and Buildings* 36 (7) : 628 – 637. Building Research and the Sustainability of the Built Environment in the Tropics. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804000155>. 25
- Nicol, J.F., and M.A. Humphreys. 2002. "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings." *Energy and Buildings* 34 (6) : 563 – 572. Ecial Issue on Thermal Comfort Standards. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000063>. 25
- Nouidui, Thierry, Michael Wetter, and Wangda Zuo. 2014. "Functional mock-up unit for co-simulation import in EnergyPlus." *Journal of Building Performance Simulation* 7 (3) : 192–202. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2013.808265>. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2013.808265>. 54, 100

Bibliographie

- Ochoa, Carlos Ernesto, and Isaac Guedi Capeluto. 2006. "Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates." *Building and Environment* 41 (8) : 1128 – 1135. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230500171X>. 34
- OFFERLE, B., P. JONSSON, I. ELIASSON, and C. S. B. GRIMMOND. 2005. "Urban Modification of the Surface Energy Balance in the West African Sahel : Ouagadougou, Burkina Faso." *JOURNAL OF CLIMATE* 18 : 3983–3995. 70
- Olgyay, V. 1963. *Design With Climate*. Princeton University Press. xv, 27, 29
- on Human Settlements, United Nations Commission. 1993. "Building materials for housing : Report of the executive director, United Nations Commission on Human Settlements." *Habitat International* 17 (2) : 1 – 20. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019739759390001S>. 10
- Ouedraogo, Idrissa M. 2010. "Electricity consumption and economic growth in Burkina Faso : A cointegration analysis." *Energy Economics* 32 (3) : 524 – 531. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988309001479>. 6
- Özdeniz, Mesut B., and Polat Hancer. 2005. "Suitable roof constructions for warm climatesâGazimaÄusa case." *Energy and Buildings* 37 (6) : 643 – 649. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804003093>. 98
- Papamichael, K. M., and V. Pal. 2002. "Barriers in Developing and Using Simulation-Based Decision-Support Software." *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings* . 44
- Parker, Danny S., and Stephen F. Barkaszi Jr. 1997. "Roof solar reflectance and cooling energy use : field research results from Florida." *Energy and Buildings* 25 (2) : 105 – 115. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778896010006>. 37
- Pedrini, A., F.S. Westphal, and R. Lamberts. 2002. "A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates." *Building and Environment* 37 (8â9) : 903 – 912. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132302000513>. 63
- Perez, R., I. Pierre, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart. 1990. "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance." *Solar Energy* 44(5) : 271–289. 54
- Pernetti, Roberta, Alessandro Prada, and Paolo Baggio. 2013. "On the influence of several parameters in energy model calibration : the case of a historical building."

- In *Proceedings of BS2013 : 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chamb ry, France, August 26-28*, . 64
- Prado, Racine Tadeu Ara jo, and Fabiana Louren o Ferreira. 2005. "Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials." *Energy and Buildings* 37 (4) : 295 – 300. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804001793>. 37, 79, 80
- Raftery, Paul, Marcus Keane, and Andrea Costa. 2011. "Calibrating whole building energy models : Detailed case study using hourly measured data." *Energy and Buildings* 43 : 3666–3679. 63
- Reagan, J.A., and D.M. Acklam. 1979. "Solar reflectivity of common building materials and its influence on the roof heat gain of typical southwestern U.S.A. residences." *Energy and Buildings* 2 (3) : 237 – 248. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378778879900094>. 70, 79
- Reddy, T.A. 2006. "Literature review on calibration of building energy simulation programs : uses, problems, procedures, uncertainty, and tools.." *ASHRAE Transactions* 112 : 26–40. 63
- Reddy, T.A., and K.A. Klaus. 2002. "An Evaluation of Classical Steady-State Off-Line Linear Parameter Estimation Methods Applied to Chiller Performance Data." *HVAC & Research* 8 (1) : 101–124. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10789669.2002.10391291>. 40
- Reddy, T.A., and I. Maor. 2006. *Procedures for reconciling computer-calculated results with measured energy data. ASHRAE Research Project 1051-RP*. Tech. rep.. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 40
- Sahlin, Per, Member Ashrae, Equa Simulation, and Technology Group Ab. 2000. *The Methods of 2020 for Building Envelope and HVAC Systems Simulation - Will the Present Tools Survive ?* 2
- Sahlin, Per, Lars Eriksson, Pavel Grozman, Hans Johnsson, Alexander Shapovalov, and Mika Vuolle. 2004. "Whole-building simulation with symbolic DAE equations and general purpose solvers." *Building and Environment* 39 (8) : 949 – 958. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304000307>. 2, 40
- Sanjai, N, and P Chand. 2008. "Passive cooling techniques in buildings : past and present a review." *ARISER* 4 : 37–46. 98

Bibliographie

- Silva, Arthur Santos, and Enedir Ghisi. 2014. "Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation." *Energy and Buildings* 76 (0) : 381 – 391. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814001935>. 63
- SP/CONAGESE, ed. . 2001. *Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques - Communication Nationale du Burkina Faso*. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/bufnc1f.pdf>. 16
- Spitz, Clara, Laurent Mora, Etienne Wurtz, and Arnaud Jay. 2012. "Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house." *Energy and Buildings* 55 (0) : 459 – 470. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004173>. 63, 64
- standard ASHRAE55. 2004. *2004 :thermal environmental conditions for human occupancy*. Tech. rep.. Atlanta, Georgia, USA : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE),. 27, 91
- Strachan, P.A. 2008. "Simulation support for performance assessment of building components." *Building and Environment* 43 (2) : 228 – 236. Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306003039>. 53
- Subbarao, K. 1988. *PSTAR Primary and Secondary Terms Analysis and Renormalization. A unified approach to building energy simulations and short-term monitoring*. Tech. rep.. SERI/TR-254-3175, Solar Energy Research Institute, Golden, CO. 63
- Susanti, L., H. Homma, and H. Matsumoto. 2011. "A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building." *Energy and Buildings* 43(1) : 211–218. 98
- Synnefa, A., M. Santamouris, and H. Akbari. 2007. "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions." *Energy and Buildings* 39 (11) : 1167 – 1174. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807000126>. 37, 98
- Tahmasebi, F., and A. Mahdavi. 2012. "OPTIMIZATION-BASED SIMULATION MODEL CALIBRATION USING SENSITIVITY ANALYSIS." In *7. konference IBPSA-CZ Brno, 8. a 9. 11. 2012*, . 64
- Tian, Zhen, and James A. Love. 2009. "Energy performance optimization of radiant slab cooling using building simulation and field measurements." *Energy and Buildings* 41 (3) : 320 – 330. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808002193>. 64

- Tiller, M. 2002. *Introduction to Physical Modeling with Modelica*. Kluwer Academic Publishers. 53
- Tittelein, P. 2008. “Environnement de Simulation adapté à l’étude du comportement énergétique des bÂtiments basse consommation.” Ph.D. thesis. Université de Savoie. 52
- Toguyeni, David Y.K., Ousmane Coulibaly, Abdoulaye Ouedraogo, Jean Kouliadiati, Yvan Dutil, and Daniel Rousse. 2012. “Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw.” *Energy and Buildings* 50 (0) : 74 – 80. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812001697>. 97
- Trcka, M., and J. L. M. Hensen. 2010. “Co-simulation for performance prediction of integrated building and HVAC systems An analysis of solution characteristics using a two-body system.” *Simulation Modelling Practice and Theory* 18(7) : 957–970. 48
- Viklund, Lars, and Peter Fritzson. 1995. “objectMath An Object-Oriented Language and Environment for Symbolic and Numerical.” *Processing in Scientific Computing*. Vol. 4 : pp. 229–250. 53
- Wetter, M. 2009. “Modelica-based modeling and simulation to support research and development in building energy and control systems.” *Journal of Building Performance Simulation* 2 : 143–XXX. 50
- Wetter, Michael. 2011a. “Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed.” *Journal of Building Performance Simulation* 4 (3) : 185–203. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/19401493.2010.518631>. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19401493.2010.518631>. 2, 40, 50, 53, 54
- Wetter, M. 2011b. *GenOpt, Generic Optimisation Program, Release 3.1.0*. Tech. rep.. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, United States. 54, 57
- Wetter, M., and J.Wright. 2004. “A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization.” *Building and Environment* 39 (8) : 989 – 999. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132304000332>. 56
- Wetter, M., and E. Polak. 2005. “Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations.” *Energy and Buildings* 37 (6) : 603–612. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804003019>. 56

Bibliographie

- Winkelmann, Frederick C., and Stephen Selkowitz. 1985. "Daylighting simulation in the DOE-2 building energy analysis program." *Energy and Buildings* 8 (4) : 271 – 286. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778885900337>. 54
- Wong, N.H., and S. Li. 2007. "A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore." *Building and Environment* 42 (3) : 1395–1405. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305005093>. 112, 113
- Yu, J., C. Yang, and L. Tian. 2008. "Low-energy envelope design of residential building in hot summer and cold winter zone in China." *Energy and Buildings* 40 (8) : 1536–1546. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808000418>. 112
- Zhai, Zhiqiang (John), and Jonathan M. Previtalli. 2010. "Ancient vernacular architecture : characteristics categorization and energy performance evaluation." *Energy and Buildings* 42 (3) : 357 – 365. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002400>. xv, xix, 7, 8